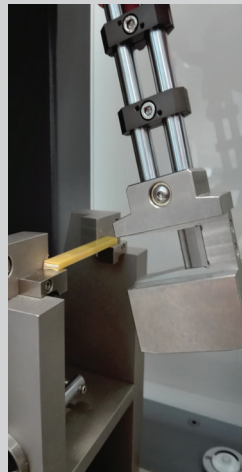
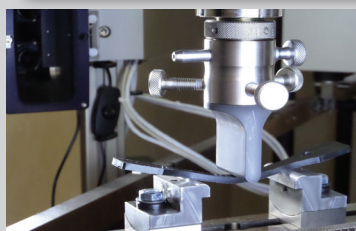




*Tomasz Garbacz
Aneta Tor-Świątek
Bronisław Samujło*

Właściwości mechaniczne i cieplne tworzyw polimerowych

Ćwiczenia laboratoryjne



PODRĘCZNIKI

Właściwości mechaniczne i cieplne tworzyw polimerowych

Ćwiczenia laboratoryjne

Podręczniki – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Tomasz Garbacz
Aneta Tor-Świątek
Bronisław Samujło

Właściwości mechaniczne i cieplne tworzyw polimerowych

Ćwiczenia laboratoryjne



Politechnika Lubelska
Lublin 2017

Recenzent:

dr hab. inż. Tomasz Rydzkowski, prof. Politechniki Koszalińskiej

Redakcja i skład: Jerzy Runowicz, Tomasz Garbacz, Aneta Tor-Świątek

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2017

ISBN: 978-83-7947-281-9

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatom.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

SPIS TREŚCI

1. Twardość	7
2. Mikrotwardość	29
3. Wytrzymałość na rozciąganie	41
4. Wytrzymałość na zginanie	59
5. Wytrzymałość na zginanie i kąt ugięcia metodą Dynstat	71
6. Wytrzymałość zmęczeniowa.....	83
7. Udarność	97
8. Rozciąganie udarowe	115
9. Właściwości tribologiczne	125
10. Temperatuty użytkowania tworzyw	137

1. Twardość

1.1. Wiadomości wstępne

Pod pojęciem twardości w odniesieniu do tworzyw polimerowych należy rozumieć opór tworzywa przy pionowym zagłębianiu się w nim obciążonego wgłębnika w kształcie kulki, stożka, lub ostrosłupa. Twardość można określić również jako odporność tworzywa na miejscowe odkształcenie trwałe wywołane działaniem obciążenia skupionego na niewielkim polu powierzchni. Metody pomiaru twardości są metodami porównawczymi i mają charakter pośredni. Różnorodność metod pomiaru twardości powoduje, że uzyskane różnymi sposobami wyniki pomiaru twardości pomiędzy poszczególnymi metodami są w większości przypadków nieporównywalne. Podobna sytuacja występuje również wówczas, gdy w zakresie jednej metody dopuszcza się różne rodzaje obciążeń i kształtów wgłębników. Porównywanie twardości jest więc możliwe jedynie w zakresie jednej metody, lub w przypadku metod, w których zasada pomiaru jest taka sama.

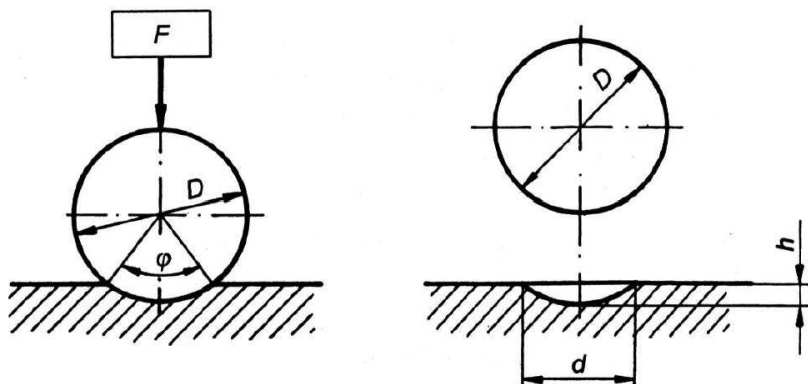
Metody pomiaru twardości tworzyw dzieli się dwie podstawowe grupy:

- stosowane do pomiaru twardości tworzyw w stanie wysokoelastycznym, elastomerów i do tworzyw bardzo miękkich, wśród których można wyróżnić metodę Shore'a, metodę IRH, metodę Schiltknechta oraz metodę Richardsona,
- stosowane do pomiaru twardości tworzyw w stanie szklistym, wśród których można wyróżnić metodę wciskania kulki, metodę Brinella oraz metodę Rockwella.

W przypadku pomiaru twardości tworzyw w stanie wysokoelastycznym i elastomerów pojęcie twardości jest dosyć umowne, wprowadzono zatem takie pojęcia jak elastyczność gumy (oznaczanej metodą Shore'a) lub miękkość gumy (oznaczanej metodą Schoppera).

Metoda wciskania kulki

Metoda polega na powolnym wciskaniu stalowej kulki w badane tworzywo. Po upływie pewnego czasu ustala się stan równowagi, w którym zwiększającą się powierzchnia odcisku równoważy wywierane obciążenie przez wgłębiającą się kulkę. W tym stanie stosunek siły obciążającej do powierzchni odcisku wgniecionego w badanym materiale określa jego twardość. Cechą charakterystyczną tworzyw jest stosunkowo szybka zmiana wymiarów odcisku po zdjęciu obciążenia, zwana powrotem poodkształceniowym, w związku z tym pomiar średnicy odcisku jest praktycznie niemożliwy. Dlatego też w metodzie wciskania

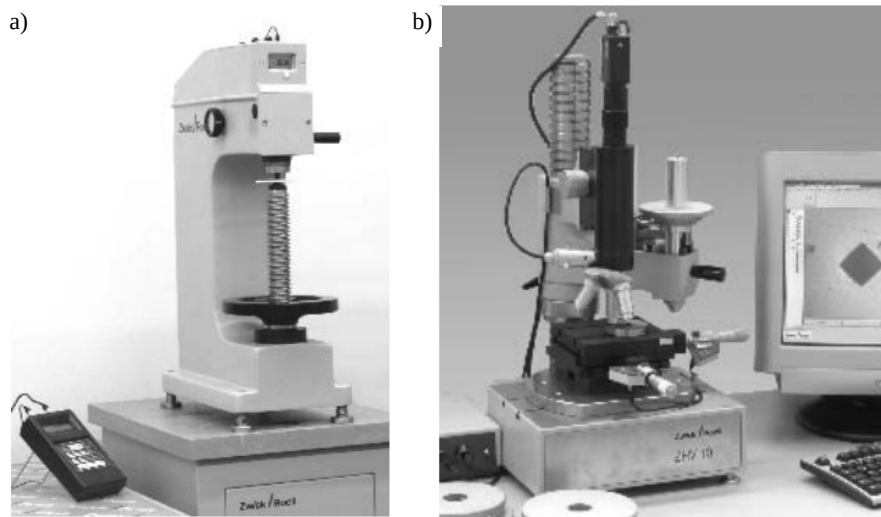


Rys. 1.1. Zasada wciskania kulki: F – kierunek nacisku, D – średnica kulki, d – średnica odcisku kulki, h – głębokość zagłębienia

kulki pomiar średnicy odcisku został zastąpiony pomiarem głębokości zagłębienia wgłębnika przy trwającym odkształceniu.

Kształt kulki decyduje o tym, że wciskanie zaczyna się od nacisku punkтового, a pole powierzchni odcisku stopniowo wzrasta. Przy małych głębokościach odcisków warstwa powierzchniowa tworzywa może wpływać na zniekształcenie wyników, przy dużych odciskach wgłębiająca się kulka rozszerza tylko powstały już odcisk. Aby uniknąć negatywnego wpływu zbyt duże i zbyt małej głębokości odcisku określono zakres zagłębiania się kulki w tworzywo, który powinien zawierać się w granicach $0,13\text{--}0,36 \cdot 10^{-3}$ m. Wymagany zakres zagłębienia kulki uzyskuje się przez właściwy dobór wartości obciążenia podstawowego. Oprócz znormalizowanego przedziału głębokości odcisku, należy zwrócić również uwagę na właściwą grubość próbki. Powinna się ona zawierać w granicach 5–10 mm. W przypadku próbek o zbyt małej grubości na skutek nacisku kulka może spowodować odkształcenie badanej próbki na skutek ściskania i w ten sposób zakłócić poprawność wykonania pomiaru.

Do badań twardości metodą wciskania kulki wykorzystuje się twardościomierze Brinella lub specjalnie dedykowane twardościomierze. Wśród urządzeń do pomiaru twardości metodą wciskania kulki możemy wyróżnić jednostki stacjonarne oraz przenośne. Przykładami jednostek stacjonarnych są: twardościomierz dedykowany twardości kulkowej Zwick Hardness Tester 3106 zaprezentowany na rys. 1.2a, wyposażony w zestaw obciążeń od 49 do 1471 N posiadającego możliwość cyfrowego odczytu danych. Pomiar realizowany jest manualnie.



Rys. 1.2. Wygląd twardościomierzy stosowanych w metodzie wciskania kulki, przykłady: a) twardościomierz Zwick HT 3106, b) twardościomierz Zwick ZVH10 [www.zwick.com.pl]

Kolejnym urządzeniem, który daje możliwość przeprowadzenia badań twardości metodą wciskania kulki jest twardościomierz Zwick ZVH10 (rys. 1.2.b). Umożliwia pomiar twardości z cyfrowym odczytem danych. Ponadto umożliwia podłączenie do komputera oraz współpracę z programami pozwalającymi na klasyfikację, porównanie czy graficzną interpretację danych. W przypadku pomiarów materiałów kompozytowych o wysokiej twardości możliwy jest cyfrowy pomiar odcisku z pomocą mikroskopu optycznego zintegrowanego z urządzeniem.

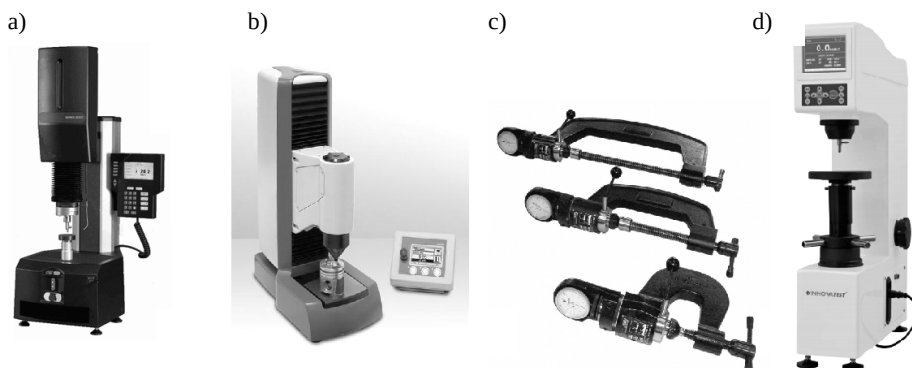
Twardość metodą Rockwella

Metoda Rockwella dla tworzyw polimerowych oraz ebonitu jest modyfikacją metody badań twardości realizowanej dla metali oraz stopów metali. Jest ona określana na podstawie głębokości wgłębienia po powrocie sprężystym. Wyróżnia się następujące skale twardości: M, L, E oraz R. Przy oznaczaniu twardości Rockwella względem tworzyw polimerowych stosuje się skalę R (twardość α -Rockwella). Rolę wgłębniaka pełni twarda kulka o średnicy $D = 12,7$ mm, natomiast wartość obciążenia głównego wynosi 588,4 N. Pomiar realizuje się według normy PN-EN ISO 2039-2:2002.

W celu przeprowadzenia pomiaru należy określić stałą sprężyny, w którą wyposażone jest stanowisko. Ustawień dokonuje się za pośrednictwem płaskorównoległego prostopadłościennego bloczku wykonanego miedzi umieszczonego w miejsce próbki. Za pomocą kilkukrotnego obciążania bloczku z pomocą obciążenia wstępnego znajduje się wielkość d_z , wyrażoną jako wielokrotność wartości 0,002 mm. Po upływie 15 s należy usunąć obciążenie główne oraz od-

czytać wskazanie ze skali czujnika. Wynik pomiaru d_h wyraża się jednostkach będącymi wielokrotnościami wartości 0,002 mm.

Podobnie jak w przypadku twardościomierzy Brinella przeznaczonych do metody wciskania kulki, również pośród aparatów do pomiaru twardości Rockwella, wyróżnić można urządzenia o charakterze ręcznym-przenośnym oraz stacjonarnym. Przykładem urządzeń o charakterze przenośnym jest twardościomierz Rockwella INMR-N4 (rys. 1.3c). Umożliwia pomiary gotowych produktów z dokładnością do 1,5 HR, co w połączeniu z niską masą zestawu czyni go przydatnym narzędziem do badań terenowych. Urządzenie bada twardość pod wpływem następujących obciążeń: 60, 100 oraz 150 kg. Maksymalny nacisk, jakie jest w stanie wygenerować urządzenie to odpowiednik 350 kg. Natomiast twardościomierz Rockwella Testlab Testor 2000 (rys. 1.3a) pozwala na bardziej dokładne oraz kompleksowe badania twardości materiałów w skali Rockwella. Umożliwia on pomiary optyczne, oraz ułatwia analizę i interpretację wyników, co w połączeniu z możliwością współpracy z komputerem otwiera daleko więcej możliwości niż urządzenie przenośne.



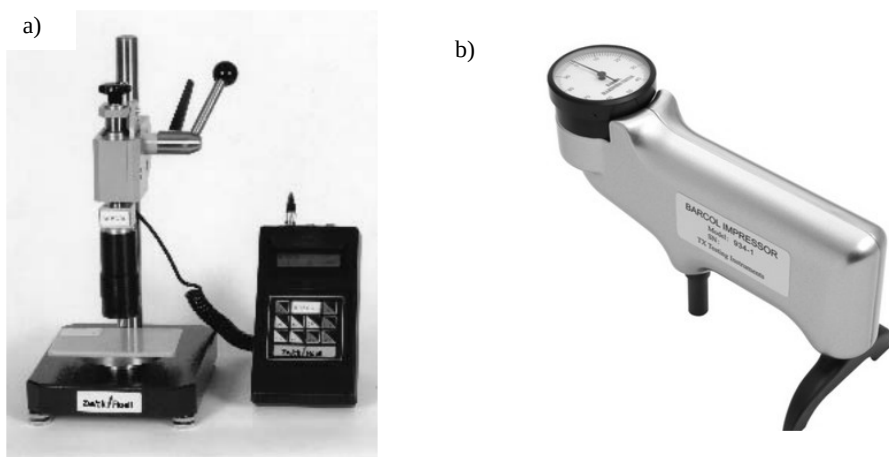
Rys. 1.3. Przykładowe twardościomierze Rockwella: a) Testlab Testor 2000, b) Struers DuraJet, c) twardościomierz INMR-N4, d) Innovatest 600 [www.testlab.com, www.struers.com, www.inmr.net, www.innovatest-europe.com]

Twardość metodą Barcola

Stosunkową nową metodą pomiaru twardości jest pomiar metodą Barcola. Została ona opracowana w Stanach Zjednoczonych i znalazła zastosowanie w badaniu twardości kompozytów w układzie żywica – polimer. Stosunkowo nieskomplikowany pomiar umożliwia zbadanie twardości, stopnia utwardzenia żywicy w procesie produkcji kompozytów o osnowie duroplastycznej, oraz jej właściwości użytkowych (wskazania stopnia twardości Barcola można traktować jako miarę stopnia degradacji chemicznej żywicy). Istotą pomiaru jest wciskanie w materiał wgłębnika o kształcie ściętego stożka o średnicy płaskiego końca równej 0,157 mm. Wynik po odczytaniu z czujnika podaje się w postaci

liczby całkowitej. Przykładowa twardość żywicy duroplastycznej wynosi ok. 35–45 stopni Barcola. Twardość kompozytów o wzmocnieniu włóknistym wyższa jest o wartość od kilku do kilkudziesięciu stopni. Wadą stosowanej metody pomiaru jest znaczny rozrzut wyników wymuszający większą liczbę pomiarów.

Również w przypadku pomiarów twardości tworzyw polimerowych metodą Barcola wyróżnić można twardościomierze stacjonarne i podręczne. Przykładami takich urządzeń mogą być: instrument pomiarowy do badań twardości Zwick Barcol Hardness Tester H.04 oraz twardościomierz podręczny INBC-01 (rys. 1.4b). Pierwszy z wymienionych przypomina konstrukcją twardościomierz Shore'a. Umożliwia pomiar wgłębnikiem o kształcie ściętego stożka w krótkim czasie. Wynik pomiaru wyświetlany jest cyfrowo na przetworniku danych A/C. Drugi z nich ze względu na małe wymiary umożliwia prowadzenie pomiarów na gotowych produktach nawet o dużych wymiarach w oparciu o odczyt z czujnika wskazówkowego. W przypadku aparatu Barcola 934-1 zestaw został wzbogacony o skalę umożliwiającą porównanie wyniku w stopniach Barcola z odpowiednikiem w skali Vickersa.



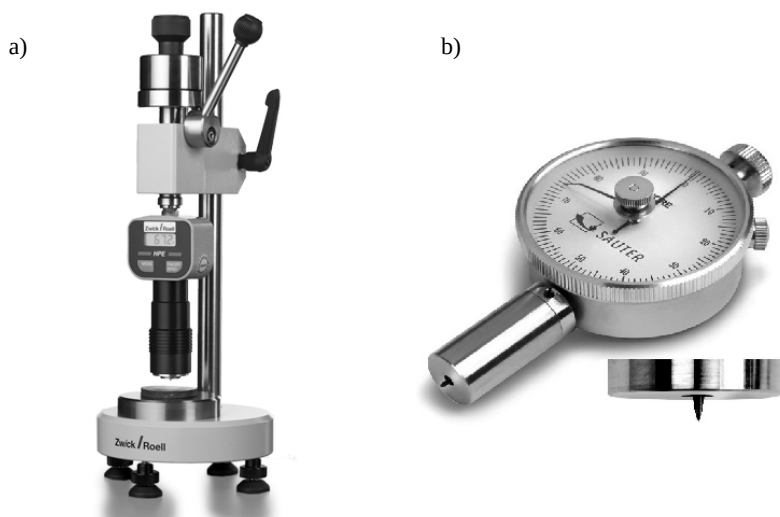
Rys. 1.4. Przykładowe twardościomierze Barcola: a) stacjonarny Zwick Barcol Tester H.04, b) ręczny twardościomierz Barcola 934-1 [www.zwick.com.pl, www.m-test.com]

Twardość metodą Shore'a

Zasada pomiaru twardości metodą Shore'a polega na wyznaczeniu oporu, jaki jest stawiany przez tworzywo badane w czasie zagłębiania w nim iglicy o znormalizowanym kształcie i wymiarach. Opór jest mierzony po upływie 3 s od chwili rozpoczęcia zagłębiania przy pomocy sprężyny o znanej charakterystyce mechanicznej. Jednostka twardości jest umowna i określa się ją w stopniach Shore'a ($^{\circ}\text{Sh}$) w zakresie od 0° (maksymalne zagłębienie iglicy) do 100°

(brak zagłębienia iglicy w tworzywie). Istnieje kilka skali twardości określających twardość gumy. Różnice (oczywiście poza wynikami) wynikają z różnych kształtów wgłębnika stosowanego w pomiarach oraz różnych wartości obciążenia. Dla metody A stosuje się obciążenie rzędu 10 N, natomiast dla twardościomierza Shore'a typu C i D stosowanego dla twardszych elastomerów oraz termoplastów i ich kompozytów obciążenie wynosi 50 N. Taki podział jest efektem przeznaczenia poszczególnych metod np.: typ A stosowany jest przy materiałach elastycznych, natomiast typ C i D dla materiałów twardszych. Wskazanie „0” dla skali Shore'a A oznacza materiał o miękkości wody, natomiast wskazanie „100” oznacza materiał wyjątkowo twardy.

Przygotowanie próbki do pomiaru wymaga materiału o kształcie płytki, krążka o grubości co najmniej 6 mm. Pomiar podobnie jak w innych metodach powinny być prowadzone w pewnej odległości od krawędzi próbki (w tym wypadku 12 mm) w trzech miejscach oddalonych od siebie o co najmniej 5 mm. Pomiar przeprowadza się poprzez zagłębienie wgłębnika o kształcie iglicy w badany materiał. Po upływie kilku sekund należy dokonać odczytu ze 100-stopniowej skali twardości. Wynik jest odwrotnie proporcjonalny do zagłębienia wgłębnika. Pomiar realizowany jest zgodnie z normą PN-EN ISO 868:2005.



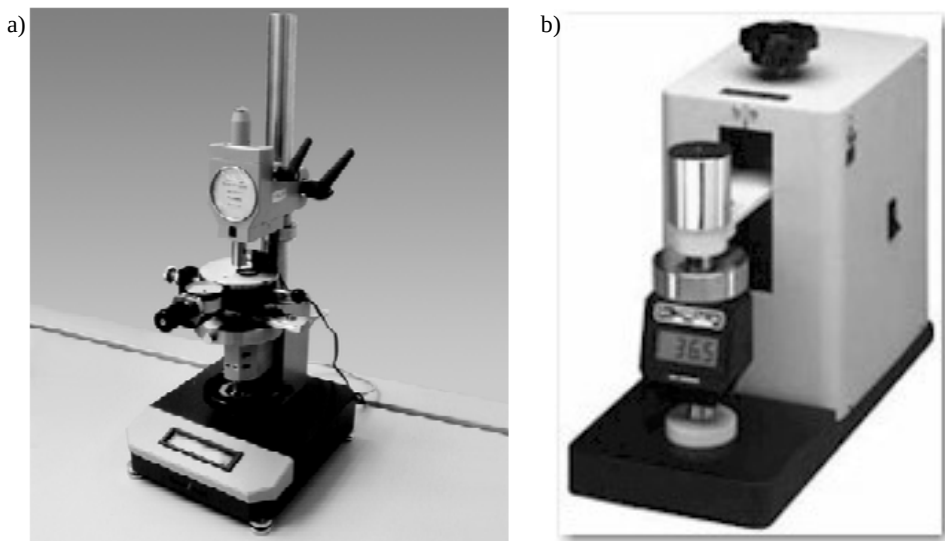
Rys. 1.5. Urządzenia do pomiaru twardości metodą Shore'a: a) Zwick 3130 na statywie, b) Sauter HTB 100 [www.zwick.com.pl, www.sauter.com]

Przykładowym urządzeniem do pomiaru twardości metodą Shore'a jest aparat firmy Zwick w wersji analogowej oraz wersji cyfrowej (rys.1.5). Jest to uniwersalny twardościomierz stosowany przy pomiarze twardości materiałów miękkich tj.: tworzywa porowate, elastomery (Shore 00), gumy i tkaniny z mate-

riałów miękkich (Shore 0), miękka guma, elastomery, kauczuk (Shore A, B), elastomery średnio twarde i twarde (Shore C), twarde elastomery i termoplasty (Shore D). Typ pomiaru zależy od kształtu wgłębnika. Ze względu na mobilność, małe wymiary oraz prostotę pomiaru testy twardości przeprowadzać można w trudno dostępnych miejscach na gotowych produktach. Istnieje również możliwość zamocowania na statywie, czyniąc przyrząd urządzeniem stacjonarnym.

Twierdzość metodą IRHD

Zasadą badania twierdzości elastomerów metodą IRHD jest pomiar różnicy wgłębienia kulki o znormalizowanym wymiarze pod wpływem obciążenia wstępnego oraz obciążenia pomiarowego. Względem różnic w potencjalnej twierdzości materiału w postaci gumy stosuje się różne rozwiązania konstrukcyjne czy też konstrukcję wgłębnika. Dla materiałów o twierdzości rzędu 10–35 IRHD stosuje się wgłębnik w postaci kulki o średnicy 5 mm, natomiast dla twardszych gum o twierdzości rzędu 35–100 IRHD wgłębnik w postaci kulki ma średnicę 1 mm. Kolejnymi warunkami, jakie spełnić musi aparat do pomiaru twierdzości metodą IRHD są: trzpień ze sferyczną końcówką, instalację termostatującą z dokładnością co najmniej 2 °C czy układ sterowania załączaniem oraz wyłączaniem obciążeń pomiarowych i wstępnych.



Rys. 1.6. Twierdzościomierze IRHD, przykłady: a) Zwick 3103, b) DuroTronic 903/2000

Przykładem urządzenia stosowanego w procesie pomiaru twierdzości metodą IRHD jest twierdzościomierz firmy Zwick model 3103 Micro Impact zaprezentowany na rys. 1.6 przystosowany do pomiaru twierdzości elementów wykonanych z elastomerów tj. oringi, węże gumowe o minimalnej grubości ścianki rzędu

0,5 mm. Zaletą urządzenia jest możliwość współpracy z programami typu testXpert umożliwiając analizę wyników z wykorzystaniem stanowiska komputerowego. Jednocześnie wyniki badań są wyświetlane na szeregowym panelu twardościomierza.

1.2. Cel ćwiczenia

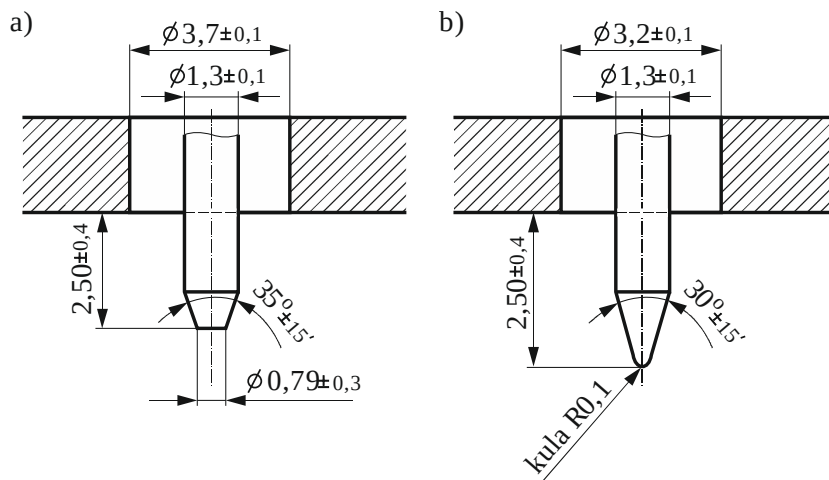
Celem ćwiczenia jest poznanie metod wyznaczania twardości tworzyw polimerowych. Celem ćwiczenia jest również wyznaczenie twardości metodą Shore'a, metodą IRHD oraz metodą wciskania kulki tworzyw z grupy elastomerów, tworzyw szklistych oraz tworzyw porowatych.

1.3. Stanowisko badawcze

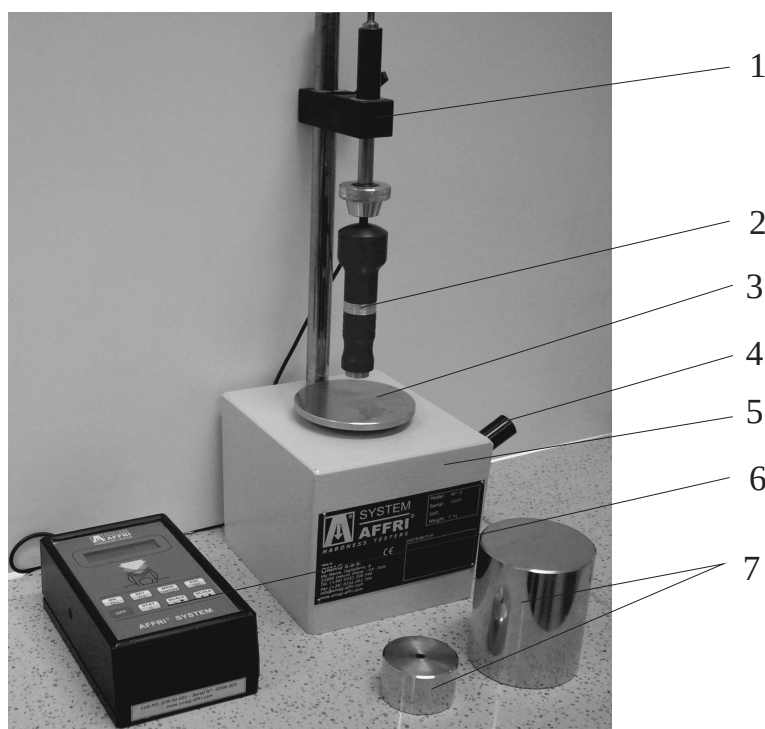
Metoda Shore'a

Oznaczanie twardości metoda Shore'a przeprowadza się przy użyciu twardościomierza ręcznego firmy Omag Affri System s.a.a. model 13. Podstawowym elementem twardościomierza jest wgłębnik w kształcie iglicy z zakończeniem mającym postać ściętego stożka (w przypadku skali A) bądź z zakończeniem stożkowym z zaokrągleniem (skala D oraz 00). Kształt i wymiary poszczególnych iglic przedstawiono na rys. 1.7.

W korpusie przyrządu (5) zamocowany jest statyw (1) do którego mocowane są wymienne głowice pomiarowe (2) o znanej charakterystyce mechanicznej. Na korpusie (5) zamocowany jest również stolik (3) mocowania próbki podnoszony i dociskany do głowicy za pomocą dźwigni (4). Wymienne obciążenie pomiarowe (7) którego wartość zależy od stosowanej skali pomiarowej, np. A, C, D, 00, mocowane jest w górnej części statywu, poprzez nakręcenie na gwint zewnętrzny. Oddzielny element twardościomierza stanowi cyfrowa jednostka pomiarowa (6), połączona z twardościomierzem za pomocą przewodu RS, na której znajduje się dotykowa klawiatura sterująca działaniem twardościomierza oraz ekran LCD, wyświetlania wyników pomiarów twardości. Wygląd twardościomierza do pomiaru twardości metodą Shore'a zamieszczono na rys. 1.7.



Rys. 1.7. Kształt i wymiary iglic twardościomierza do pomiaru twardości metodą Shore'a: a) iglica do pomiaru twardości wg skali A oraz C, b) iglica do pomiaru twardości wg skali D

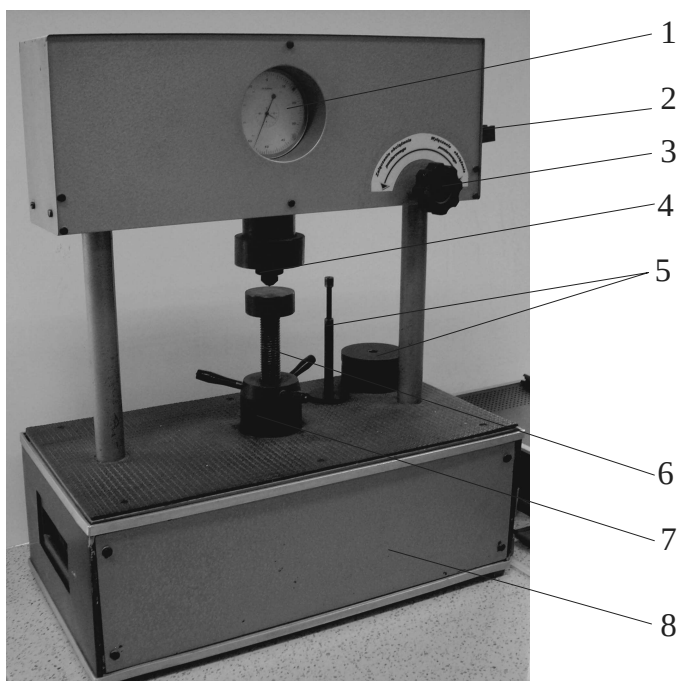


Rys. 1.8. Twardościomierz Shore'a Omag Affri System s. a. a. model 13: 1 – statyw, 2 – głowica pomiarowa, 3 – stolik pomiarowy, 4 – dźwignia, 5 – korpus, 6 – cyfrowa jednostka pomiarowa, 7 – obciążenia pomiarowe do skali A oraz skali D

Użyty w badaniach twardościomierz Shore'a ma cyfrowy układ przetwarzający dane pochodzące z głowicy pomiarowej na sygnał cyfrowy, z podświetlanym wyświetlaczem dla wszystkich skal Shore'a oraz automatyczne rozpoznawanie podłączonej głowicy pomiarowej z wyborem skali twardości, możliwość zapamiętania do 100 wyników pomiarów. Posiada też trzy tryby wydruku wyników pomiarów, funkcję statystyczną z wykresem słupkowym, komunikację z komputerem poprzez interfejs, natychmiastowy odczyt wyników, lekką głowicę pomiarową z ergonomicznym uchwytem.

Metoda wciskania kulki

Przyrządem do pomiaru twardości tworzyw polimerowych metodą wciskania kulki jest twardościomierz HPK 8411, którego wygląd jest przedstawiony na rys. 1.9. W górnej części przyrządu znajduje się czujnik mikrometryczny (2) do odczytu wartości zagłębienia kulki, głowica wgłębnika (4) oraz mechanizm dźwigniowy (4) z zapadką (3) oraz obciążeniem pomiarowym (5) do wywierania obciążenia wgłębnika. W korpusie (8) przyrządu znajduje się ułożyskowana nakrętka (7) służąca po podnoszenia i opuszczania stolika pomiarowego (6).



Rys. 1.9. Twardościomierz HPK 8411 do pomiaru twardości metodą wciskania kulki: 1 – czujnik mikrometryczny, 2 – mechanizm dźwigniowy, 3 – zapadka dźwigni, 4 – głowica wgłębnika, 5 – obciążenia pomiarowe, 6 – stolik pomiarowy, 7 – nakrętka, 8 – korpus

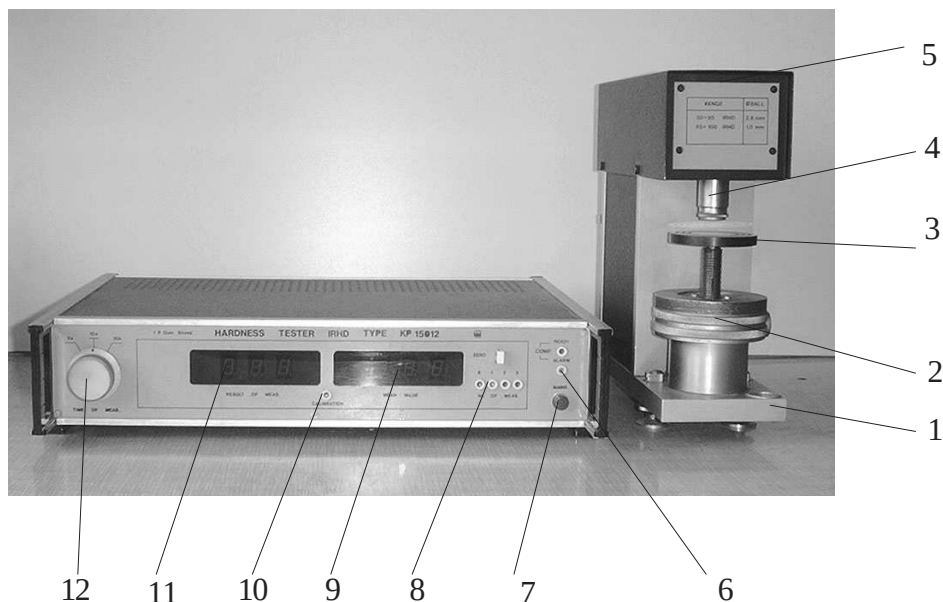
Twardościomierz HPK 8411 jest wyposażony w kulkę o średnicy $5 \pm 0,025$ mm oraz posiada następującą skalę obciążeń: obciążenie wstępne $P' = 9,81$ N oraz obciążenie podstawowe $P = 49,03$ N, $P = 132,39$ N, $P = 357,94$ N oraz $P = 961,05$ N.

W skład stanowiska do pomiaru twardości tworzyw polimerowych poza opisanym wyżej twardościomierzem wchodzi jeszcze: suwmiarka do pomiaru grubości próbek i sekundomierz do pomiaru czasu trwania obciążenia.

Metoda IRH

Urządzeniem służącym do pomiaru twardości elastomerów metodą IRH jest twardościomierz IRHD typ KP 15012. Przyrząd składa się z dwóch części: zespołu pomiarowego i panela elektronicznego. Zakres pomiarowy twardościomierza pozwala na określanie twardości tworzyw w zakresie od 10 do 100 jednostek IRHD. Konstrukcja twardościomierza zapewnia cyfrowy odczyt kalibracji obciążenia wstępnego, cyfrowy odczyt wyniku pomiaru bezpośrednio w stopniach IRH oraz wartość średniej twardości IRHD z serii trzech pomiarów.

Wygląd ogólny twardościomierza KP 15012 przedstawiono na rys. 1.10.



Rys. 1.10. Budowa twardościomierza KP 15012: 1 – podstawa, 2 – nakrętka regulacji, 3 – stolik pomiarowy, 4 – wgłębnik, 5 – osłona górna, 6 – wskaźnik *Gotów - Alarm*, 8 – zespół wskaźników *Numer pomiaru*, 9 – wyświetlacz wartości średniej wyniku pomiaru, 10 – wyświetlacz kalibracji i obciążenia wstępnego, 11 – wyświetlacz wartości pomiaru, 12 – pokrętko wyboru czasu pomiaru

Zespół pomiarowy twardościomierza składa się z obudowy oraz podstawy (1) na której jest zamocowany stolik pomiarowy (3) w raz z nakrętką regulacji (2) położenia stolika. W części górnej zespołu pomiarowego, pod osłoną (5) znajduje się przesuwany obciążnik służący do wyważania układu pomiarowego oraz układ wgłębnika (4) zakończony kulką pomiarową. Twardościomierz KP 15012 wyposażony jest w kulkę o średnicy 1 mm lub 2,5 mm. Pomiar wykonuje się pod obciążeniem wstępnym $P' = 3,2 \text{ N}$ oraz pomiarowym $P = 5,7 \text{ N}$, zaś czas pomiaru wynosi 5, 15 lub 30 s.

Zespół pomiarowy współpracuje z panelem elektronicznym, wyświetlającym wynik pomiaru bezpośrednio w stopniach IRHD.

1.4. Program ćwiczenia

W programie badań przyjęto jako czynniki badane:

Metoda Shore'a

- 1) bezpośrednio; grubość oraz powierzchnię przekroju poprzecznego próbki do badań, mm,
- 2) pośrednio; twardość próbek, °Sh.

Czynnikiem zmiennym jest:

- rodzaj badanego tworzywa (po dwa rodzaje tworzywa z grupy elastomerów, tworzyw szklistych, tworzyw porowatych),
- rodzaj głowicy pomiarowej, do badań metodą A, D, 00,
- rodzaj obciążenia pomiarowego, do badań metodą A, D, 00.

Czynniki stałymi są elementy konstrukcyjne twardościomierza.

Metoda wciskania kulki

- 1) bezpośrednio;
 - grubość oraz powierzchnię przekroju poprzecznego próbki, mm,
 - wgłębienie kulki w materiał badany, h , mm,
 - odkształcenie po zdjęciu obciążenia, h_0 , mm,
- 2) pośrednio;
 - twardość materiału, H , MPa,
 - współczynnik sprężystości wzdłużnej, E , Pa.

Czynnikiem zmiennym jest:

- rodzaj badanego tworzywa (minimum dwa rodzaje tworzywa z grupy tworzyw szklanych),
- wielkość obciążenia pomiarowego: $P = 49,03 \text{ N}; 132,39 \text{ N}; 357,94 \text{ N}; 961,05 \text{ N}$.

Czynnikami stałymi są elementy konstrukcyjne twardościomierza.

Metoda IRH

- 1) bezpośrednio; grubość oraz powierzchnię przekroju poprzecznego próbki do badań, mm,
- 2) pośrednio; twardość próbek, °IRHD.

Czynnikiem zmiennym jest rodzaj badanego tworzywa (dwa rodzaje tworzywa z grupy elastomerów).

Czynnikami stałymi są elementy konstrukcyjne twardościomierza.

Czynniki zakłócające mogące wystąpić podczas pomiarów twardości omawianymi metodami, których wpływ jest pomijalnie mały, to przede wszystkim niestabilność prądu elektrycznego, zmiany temperatury otoczenia, wilgotności tworzywa wejściowego oraz wilgotności względnej powietrza.

1.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

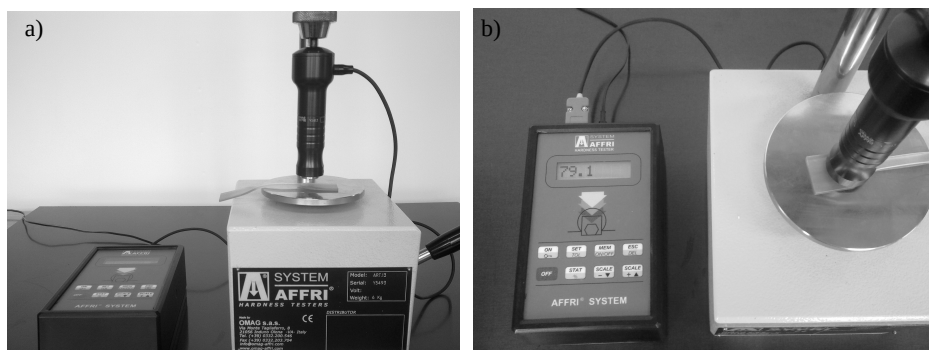
Metoda Shore'a

Próbki do pomiaru twardości metodą Shore'a powinny mieć kształt krążków lub prostokątnych płytek o grubości nie mniejszej niż 5 mm i pozostałych wymiarach umożliwiających wykonanie pomiarów w trzech punktach odległych od siebie co najmniej o 5 mm oraz nie mniej niż 13 mm od krawędzi próbki. Jest dopuszczalne przeprowadzenie pomiarów twardości na próbkach złożonych z kilku warstw, pod warunkiem, że grubość pojedynczej warstwy nie będzie mniejsza niż 2 mm, a liczba warstw nie przekroczy trzech. Pole powierzchni próbki musi być wystarczające do wykonania co najmniej sześciu pomiarów. Wskazane jest, aby odległość punktu od krawędzi próbki wynosiła co najmniej 6 mm, a odległość pomiędzy środkami poszczególnych zagłębień kulki miała wartość co najmniej 12 mm. W przybliżeniu można przyjąć pole powierzchni próbki około 1000 mm^2 . Powierzchnia próbki, na której przeprowadza się pomiar i powierzchnia podstawy próbki powinny być gładkie, wzajemnie równoległe oraz prostopadłe do kierunku działania siły.

Przed przystąpieniem do pomiaru twardości próbki poddaje się klimatyzacji w temperaturze 20 ± 2 °C i wilgotności względnej powietrza $65 \pm 5\%$ w czasie 24 ± 1 godziny.

Istotą badania twardości metodą Shore’a jest wciskanie wgłębnika w badaną próbkę pod określonym obciążeniem pomiarowym. Kształt wgłębnika oraz wartość obciążenia pomiarowego jest ściśle powiązana z rodzajem badanego materiału. W przypadku metody Shore’a 00, do tworzyw porowatych, wgłębnik ma kształt półkolisty, a wartość obciążenia jest znikoma. Dla metody Shore’a A należy zastosować wgłębnik o kształcie ściętego stożka o znormalizowanych wymiarach oraz obciążeniu ujętym w normie. Dla metody Shore’a D wgłębnik ma postać stożka, a wartość obciążenia jest wyższa niż w poprzednich metodach. Podyktowane jest to zastosowaniem wymienionej metody w pomiarach twardości tworzyw szklanych o dużej twardości.

Wynikiem pomiaru twardości metodą Shore’a jest twardość w stopniach °Sh wartość odpowiadająca odwrotności zagłębienia wgłębnika pod działaniem stałej siły. Maksymalnym zagłębieniem jest głębokość $h = 2,5 \pm 0,004$ mm, któremu przypisuje się wartość 0 °Sh.



Rys. 1.11. Wygląd twardościomierza Shore’a podczas prowadzonych pomiarów twardości skala D

Metoda wciskania kulki

Pole powierzchni próbek stosowanych w metodzie wciskania kulki musi być wystarczające do wykonania co najmniej sześciu pomiarów. Wskazane jest, aby odległość punktu od krawędzi próbki wynosiła co najmniej 6 mm, a odległość pomiędzy środkami poszczególnych zagłębień kulki miała wartość co najmniej 12 mm. W przybliżeniu można przyjąć powierzchnię próbki około 1000 mm^2 . Grubość próbki nie może być mniejsza niż 4 mm. Zaleca się, aby wynosiła ona 5–10 mm. Powierzchnia próbki, na której przeprowadza się pomiar i powierzchnia podstawy próbki powinny być gładkie, wzajemnie równoległe oraz prostopadłe do kierunku działania siły.

Z gotowych wyrobów i płyt próbki należy wyciąć metodami obróbki mechanicznej, w innych przypadkach próbki należy wykonać stosując odpowiednią metodę przetwórstwa.

Kolejność czynności przy przeprowadzeniu pomiaru twardości metodą wciskania kulki jest następująca.

Należy ułożyć próbkę z tworzywa na stoliku pomiarowym, a następnie podnieść stół do góry przy pomocy nakrętki aż do zetknięcia się powierzchni próbki z kulą pomiarową wgłębnika.

Następnie należy nałożyć na wgłębnik obciążenie wstępne $P' = 9,81 \text{ N}$, w tym celu należy w dalszym ciągu podnosić stół pomiarowy aż do momentu, kiedy wskazówki wskaźnika mikrometrycznego zostaną ustawione w pozycji "0".

Następnie trzeba wyrzucić na wgłębnik obciążenie podstawowe P o wartości = 49,03 N lub 132,39 N lub 357,94 N lub 961,05 N, dobranej w taki sposób, aby zagłębienie się kulki w badane tworzywo, wskazywane przy nałożonym obciążeniu po 60 s działania tego obciążenia wynosiło 0,15–0,36 mm.

Odczytać na skali głównej czujnika mikrometrycznego po czasie 60 sekund wartość zagłębienia się kulki w próbkę h oraz odkształcenie po zdjęciu obciążenia, h_o .

Zablokować za pomocą zapadki dźwigni obciążenie podstawowe, opuścić stół pomiarowy, zmienić próbkę.

Wykonać pomiary dla następnych próbek, zgodnie z zaleceniem prowadzącego zajęcia.

Twardość badanego tworzywa należy obliczyć z zależności

$$H = 63,69 \frac{P}{h}, \text{ MPa} \quad (1.1)$$

gdzie: P – wartość obciążenia podstawowego, N, h – wartość zagłębienia się kulki w tworzywo, mm.

Wartość twardości H dla wartości zagłębienia h , zgodnie z zaleceniem prowadzącego, można również odczytać z tabeli znajdującej się normie "PN-EN ISO 2039-1:2004: Tworzywa sztuczne. Oznaczanie twardości. Część I. Metoda wciskania kulki".

Współczynnik sprężystości wzdłużnej obliczyć ze wzoru

$$E = 13,65 \frac{P - P'}{(h - h_o) \sqrt{(h - h_o)}}, \text{ Pa} \quad (1.2)$$

Metoda IRH

Próbki do pomiaru twardości metodą IRH mają kształt płytki lub krążka. Jest wskazane zastosowanie próbek o grubości 8–10 mm. Można stosować próbki o innej grubości, jednakże nie mniejszej niż 4 mm. Dopuszczalna różnica mię-

dzy maksymalną, a minimalną grubością próbki nie może być większa niż 0,2 mm.

Próbki z gumy przygotowuje się poprzez wulkanizowanie w formie lub wycięcie z gotowego produktu. Powierzchnie próbek muszą być gładkie, bez pęknięć, pęcherzy i obcych wtrąceń widocznych gołym okiem. Warunkiem niezbędnym do prawidłowego przeprowadzenia pomiaru twardości jest wzajemna równoległość górnej i dolnej powierzchni próbki.

Kolejność czynności przy wykonywaniu pomiarów jest następująca:

- sprawdzić rodzaj założonego wglębnika,
- umieścić próbkę na stoliku pomiarowym,
- ustawić, za pomocą przełącznika przełącznik czas pomiaru na wartość 5, 15 lub 30 sekund, w zależności od zaleceń prowadzącego,
- podnieść stół przedmiotowy przy pomocy nakrętki aż do zetknięcia się próbki ze stopką urządzenia dociskowego,
- podnosić stół w dalszym ciągu obserwując wskazania wyświetlacza „Wynik pomiaru”, aż do pierwszego zaświecenia się wskaźnika „Kalibracja” – w tej fazie pomiaru na próbkę działa obciążenie wstępne,
- wyrzucić obciążenie główne, po 15 lub 30 sekundach pojawi się wynik pomiaru bezpośrednio w stopniach IRHD – w tej fazie pomiaru na próbkę działa obciążenie pomiarowe,
- powtórzyć pomiar próbki trzy razy w innych miejscach – po serii trzech pomiarów na wyświetlaczu „Wartość średnia” pojawi się wynik z przeprowadzonych pomiarów, będący miarą twardości w skali IRHD.

Za wyniki pomiaru twardości wyznaczanej wszystkimi metodami (wciskania kulki, Shore’a i IRH) należy przyjąć wartości średniej arytmetycznej poszczególnych pomiarów, przy uwzględnieniu oceny odchylenia standardowego S otrzymanych wyników.

Odchylenie standardowe obliczyć z zależności

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (1.3)$$

gdzie: x – wynik poszczególnego pomiaru, $\bar{x}$ – średnia arytmetyczna poszczególnych pomiarów, n – liczba wykonanych pomiarów.

1.6. Wyniki, sprawozdanie

Wyniki pomiarów i badań należy zestawiać w tabelach 1–3 we wzorze sprawozdania. Interpretację graficzną wyników prowadzonych badań twardości, dla różnych rodzajów tworzyw przedstawić w formie wykresów blokowych.

Prawidłowo sporządzone sprawozdanie powinno zawierać: cel ćwiczenia, przebieg ćwiczenia, wyniki pomiarów twardości zestawione w tabelach, interpretację wyników w postaci wykresów, wnioski wynikające z przeprowadzonego ćwiczenia.

Literatura

- [1] *Dokumentacja techniczno-ruchowa twardościomierza Omag Affri System s.a.a. model 13*, Lublin 2008.
- [2] *Dokumentacja techniczno-ruchowa twardościomierza KP 15012*, Lublin 2008.
- [3] *Dokumentacja techniczno-ruchowa twardościomierza HPK 8411*, Lublin 2008.
- [4] Sikora R., *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
- [5] Broniewski T., Kapko J., Płaczek W., Thomalla J., *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [6] PN-EN ISO 868:2005. *Tworzywa sztuczne i ebonit – Oznaczanie twardości metodą wciskania z zastosowaniem twardościomierza (twardość metodą Shore’a)*.
- [7] PN-ISO 48:1998/A1:2000. *Guma i kauczuk termoplastyczny. Oznaczanie twardości (twardość w zakresie od 10 IRHD do 100 IRHD)*.
- [8] PN-EN ISO 2039-1:2004. *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie twardości. Część I. Metoda wciskania kulki*.

Politechnika Lubelska Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych Laboratorium:			
Temat ćwiczenia: Twardość		Nr ćwiczenia	Data wykonania
Nazwisko i imię	Ocena	Grupa	Semestr
			Rok akademicki

1. Cel ćwiczenia

2. Charakterystyka badań

3. Przebieg ćwiczenia

4. Wyniki

Tabela 1

Wyniki pomiaru twardości metodą Shore’a

Lp.	Materiał próbki	Rodzaj metody	Twardość °Sh	Wartość średnia $\overline{°Sh}$	Odchylenie standardowe S_{Sh}
1					
2					
3					
4					
5					
1					
2					
3					
4					
5					

Twardość °Sh					

rodzaj materiału

Tabela 2

Wyniki pomiaru twardości metodą wciskania kulki

Lp.	Materiał próbki	P N	h mm	h_o mm	H MPa	$\overline{H}$ MPa	E	$\overline{E}$ Pa
1								
2								
3						S_H		S_E
4								
5								
1								
2								
3						S_H		S_E
4								
5								

Twardość
°H

rodzaj materiału

Tabela 3

Wyniki pomiaru twardości metodą IRH

Lp.	Materiał próbki	Rodzaj metody	Twardość $^{\circ}IRHD$	Wartość średnia $^{\circ}IRHD$	Odchylenie standardowe S_{IRHD}
1					
2					
3					
4					
5					
1					
2					
3					
4					
5					

Twardość
 $^{\circ}IRHD$

rodzaj materiału

5. Wnioski

Data Podpis

2. Mikrotwardość

2.1. Wiadomości wstępne

W celu zapewnienia wysokiej jakości i ciągłości rozwoju dynamicznie rozwijającej się dyscypliny naukowej, jaką jest przetwórstwo polimerów stosuje się wysoką kulturę techniczną popartą rozwijającą się wiedzą teoretyczną. Za pierwszy element odpowiada rozwój technik przetwórczych, mających wpływ na poprawę efektywności idącą w parze ze wzrostem jakości. Wiedzy teoretycznej dostarczają nam kompleksowe badania właściwości fizycznych, chemicznych oraz wszelkich procesów z nimi powiązanych. Jest to szczególnie ważne by znać ich właściwości, ponieważ polimery konstrukcyjne zaczęły wypierać materiały stosowane od setek lat, których właściwości są doskonale znane. Wśród ważnych metod kontroli jakości poprzez badanie właściwości użytkowych kompozytów polimerowych są pomiary twardości. Badanie tej cechy materiału kompozytowego dostarcza nam wielu cennych informacji pozwalających określić jego zastosowanie, przydatność jako tworzywa konstrukcyjnego czy możliwość dalszej obróbki materiału.

Badania mikrotwardości dostarczają niezbędnych informacji na temat badanego kompozytu polimerowego. Pozwalają określić zjawiska zachodzące w skali mikro tj.: procesy dyfuzji, odkształcenia plastycznego, właściwości anizotropowych oraz szeregu innych czynników wpływających na własności kompozytu.

Pod pojęciem mikrotwardości rozumiemy twardość zespołu ziaren lub stref warstwy wierzchniej ustalonej pod wpływem pomiaru wykonanego pod wpływem małej siły oddziaływującej na wgłębnik o wyższej twardości od badanego materiału. Wgłębnik musi być skierowany pionowo oraz prostopadle względem badanej próbki [1, 2]. Na mikrotwardość wpływ mają czynniki tj.: struktura powierzchni, typ wzmocnienia, stosunek objętościowy napełniacza do osnowy, procesy starzenia powierzchni.

Badania mikrotwardości są metodą pomiarów twardości pod niskim obciążeniem. Przeznaczone są dla badań dotyczących twardości powierzchni, nanoszonych cienkich warstw oraz w celu zbadania zjawisk zachodzących w warstwie wierzchniej materiału poddanemu obserwacji. Stąd też otrzymane wyniki mają niewielką wartość rzędu kilku stopni w skali Vickersa. Mikrotwardość jako wartość liczbową definiuje się jako iloraz obciążenia zastosowanego w pomiarach do pola powierzchni bocznej ostrosłupa o podstawie kwadratu, jaki powstał w wyniku przeprowadzonych badań.

W przypadku pomiarów mikrotwardości stosuje się pomiary na urządzeniach zwanych mikrotwardościomierzami. Najpopularniejszą metodą stosowaną w pomiarze mikrotwardości materiałów polimerowych a także ich kompozytów jest pomiar metodą Vickersa dla pomiarów twardości powierzchni o sile niższej

od 9,8 N. Wymieniony sposób jest zaadoptowaną metodą stosowaną dla pomiarów mikrotwardości metali [1, 4].

Metody pomiaru mikrotwardości

Najbardziej rozpowszechnionymi metodami pomiaru mikrotwardości są:

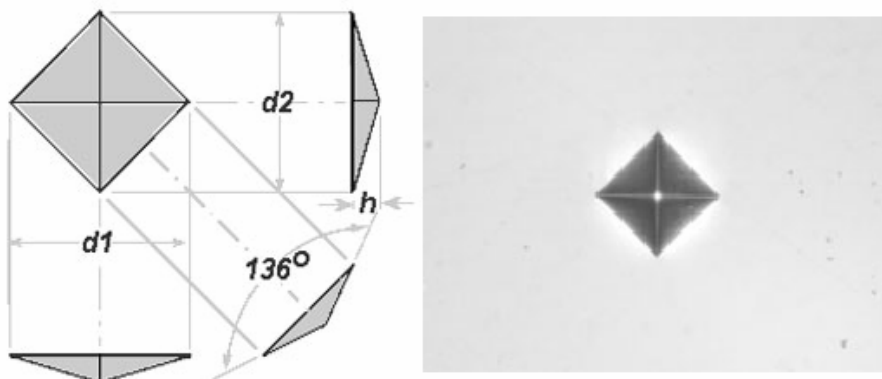
- Pomiar mikrotwardości metodą Vickersa
- Pomiar Mikrotwardości metodą Knoopa

Mikrotwardość metodą Vickersa

Metoda pomiaru mikrotwardości została zaprezentowana po raz pierwszy w roku 1925 w Anglii. Zasada pomiaru mikrotwardości metodą Vickersa właściwie nie różni się od zasady pomiaru makrotwardości. Istotna różnica polega nie tylko w zastosowaniu mniejszych obciążeń, ale przede wszystkim w dokładności wykonania wgłębnika, gładkości badanej powierzchni i innych elementów mających wpływ na wynik pomiaru. Ostrosłup diamentowy wgłębnika powinien mieć między przeciwległymi ścianami kąt równy 136° . Wszystkie ściany ostrosłupa powinny być jednakowo nachylone do osi z dokładnością do $20'$. Pomiar realizowany jest zgodnie z normą pomiarów Vickersa pod niskim obciążeniem [4]. Wierzchołek powinien być ostro zakończony. Geometrię wgłębnika i przykładowy odcisk przedstawiono na rysunku 2.1.

Ostrosłup powinien być wypolerowany i nie powinien wykazywać pęknięć, zadrapań lub innych wad widocznych przy powiększeniu 50-krotnym. Krawędzie i wierzchołek nie powinny wykazywać wykruszeń i innych wad widocznych przy 500-krotnym powiększeniu. Robocza część wgłębnika i badana powierzchnia próbki powinny być w czasie próby suche oraz odtłuszczone [5, 6].

W celu otrzymania prawidłowego wyniku pomiaru należy bardzo starannie przygotować powierzchnię przedmiotu. Szlifowanie i polerowanie mechaniczne powoduje zgniot materiału, który wpływa istotnie na wynik pomiaru mikrotwardości. Zgniota po polerowaniu mechanicznym można usunąć przez zastosowanie polerowania elektrolitycznego. Polerowanie mechaniczne stosowane do próbek metalograficznych ma również szerokie zastosowanie do próbek przeznaczonych do pomiarów mikrotwardości.



Rys. 2.1. Wgłębnik stosowany w metodzie Vickersa oraz odcisk powstały w wyniku pomiaru [7]

Wytrawione próbki gotowe do obserwacji należy zabezpieczyć przed szkodliwym działaniem wilgoci atmosferycznej przez przechowywanie ich w eksykatorach ze środkami odwadniającymi (np. chlorku wapnia). Przed ostatecznym wytrawieniem w celu lepszego uwidocznienia badanej struktury zaleca się próbkę trawić dwa razy [1, 3]. Grubość próbki lub badanej warstwy powinna wynosić co najmniej $2/3$ długości przekątnej odcisku. Na odwrotnej stronie próbki nie powinno być śladów odkształceń wywołanych działaniem obciążenia wgłębnika pod miejscem odcisku. Obciążenie wgłębnika może wynosić: 0,049; 0,098; 0,196; 0,49; 0,98; 1,96 i 4,9 N, ale dopuszcza się dowolne obciążenia poniżej 9,8 N. Dla uzyskania prawidłowych wyników pomiarów bardzo ważne jest, aby zetknięcie się powierzchni oraz wgłębnika nastąpiło bez uderzeń i wstrząsów. Norma ogranicza czas zwiększania obciążenia do osiągnięcia żądanej siły P do 15 s [1]. Czas utrzymania całkowitego obciążenia F na wgłębnik zgodnie z normą powinien wynosić 15 s. Przedmiot badany powinien być ułożony na stoliku przedmiotowym tak, aby badana powierzchnia płaska była prostopadła do osi wgłębnika (kierunku obciążenia). Pomiaru przekątnych odcisku dokonuje się za pomocą urządzenia odczytowego mikroskopu, a długość przekątnej oblicza się ze wzoru:

$$d = D \cdot m \quad (2.1)$$

gdzie: D – wartość działki elementarnej podziałki mikroskopu pomiarowego w mm,
 m – liczba odczytanych działek.

Mikrotwardość (μHV) oblicza się ze wzoru:

$$\mu HV = \frac{0,189 \cdot P}{d_{rz}^2} \quad (2.2)$$

gdzie: P – wartość obciążenia, d – wymiar przekątnej odcisku.

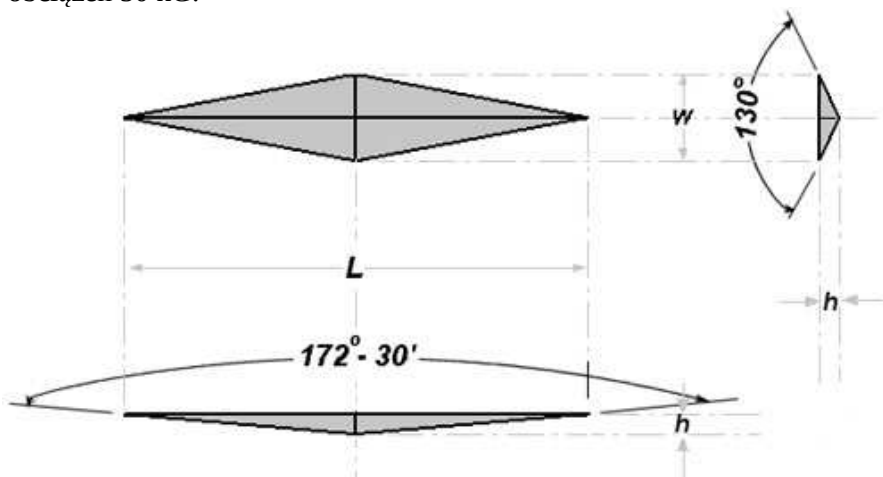
Jeżeli urządzenie pomiarowe umożliwia pomiar dwóch przekątnych, to należy dokonać pomiaru obu przekątnych odcisku i obliczyć średnią arytmetyczną. Różnica przekątnych odcisku nie powinna przekraczać błędu 5%. Twardość odczytuje się z tablic na podstawie przekątnych odcisku. Twardość równą lub większą od 100 HV należy podawać przy dokładności równej lub mniejszej niż 1 HV, a twardość poniżej 100 HV – z dokładnością nie mniejszą niż 0,1 HV [5, 6].

Mikrotwardość metodą Knoop

Metoda opracowana oraz zaprezentowana w roku 1939 przez Biuro Standaryzacji zlokalizowane w USA [1, 3]. Pomiar tym sposobem polega na statycznym wciskaniu diamentowego ostrosłupa o podstawie rombu (rys. 2.2) w płaską oraz gładką powierzchnię przedmiotu. Przeciwnieległe krawędzie kąta bryłowego ostrosłupa tworzą różne kąty, przy czym kąt większy = $172^{\circ} 30'$, a mniejszy = 130° . Obraz odcisku jest zawsze rombem o stosunku przekątnych równym 7.

Twardością Knoopa HK nazywa się stosunek obciążenia siłą F w kilogrammach – siły (kG) do pola A w mm^2 odnoszącą się do rzutu powierzchni odcisku na badaną powierzchnię.

Pomiar mikrotwardości sposobem Knoopa można stosować do badań w granicach obciążeń od 0,025 kG do 0,1 kG lub do pomiarów makrotwardości do obciążeń 50 kG.



Rys. 2.2. Charakterystyka geometryczna głębnika stosowanego w metodzie Knoopa [www.struers.com]

Zaletami pomiaru twardości metodą Knoopa są:

- mała głębokość odcisku ok. 1/30 większej przekątnej rombu,
- możliwość badania materiałów bardzo twardych i kruchych, jak np.: szkło, emalia, które przy innych pomiarach pękają.

Wartość mikrotwardości wyznaczamy z zależności:

$$\mu_{HK} = \frac{P}{A} \quad (2.3)$$

gdzie: P – wartość obciążenia, A – powierzchnia odcisku.

2.2. Cel ćwiczenia

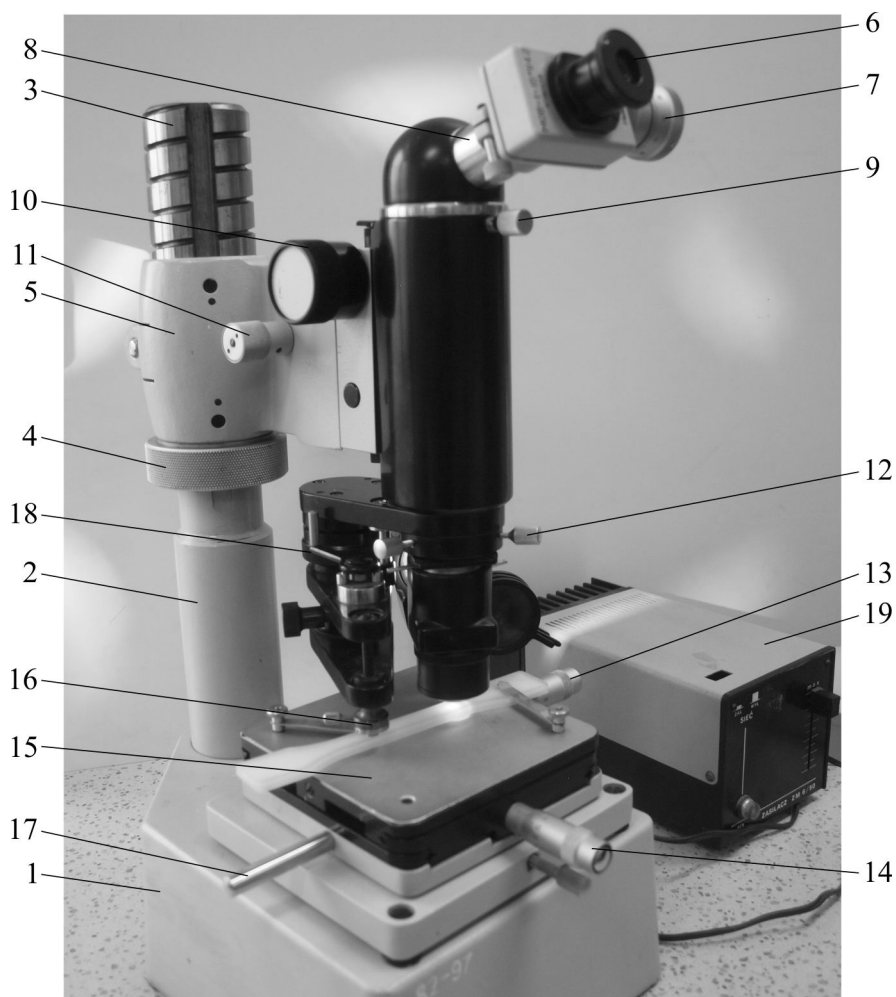
Celem ćwiczenia jest poznanie zjawiska mikrotwardości, budowy mikrotwardościomierzy oraz wyznaczenie wielkości charakteryzujących mikrotwardość wybranych tworzyw polimerowych.

2.3. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze, obejmuje mikrotwardościomierz PMT-3 wyposażony w mikrometr optyczny MOW 1-1-15x. Ogólną budowę stanowiska przedstawiono na rysunku 2.3 i 2.4.

W skład urządzenia PMT-3 wchodzi następujące układy:

- 1) Układ regulacji wysokości całego zestawu składający się z nakrętki 4 osadzonej na nagwintowanej kolumnie 3. Umieszczony na nakrętce 4 korpus mocujący 5 ulega przesunięciu w kierunku pionowym o najwyższym zakresie. Blokowany za pośrednictwem pokrętła 25. Układ służy do zgrubnego ustawienia zestawu nad badaną próbką. Elementem odpowiedzialnym za ruch pionowy mikroskopu oraz układu mocowania i obciążania wgłębnika jest pokrętło 10. Służy do dosunięcia mikroskopu oraz wgłębnika do badanej próbki. Maksymalny zakres ruchu pionowego uzyskiwany za pośrednictwem pokrętła 10 jest dużo niższy od zakresu ruchu układu korpus – nakrętka – śruba. Blokowany za pośrednictwem dźwigni blokującej 27. Za ustawienie ostrości obiektywu 22 odpowiada bęben śruby mikrometrycznej 11. Wyróżnia się najmniejszym zakresem regulacji wysokości ze względu na pełnioną funkcję.
- 2) Układ regulacji poziomej stolika pomiarowego, w skład którego wchodzi śruby mikrometryczne posuwu wzdłużnego 14 oraz poprzecznego 13, dźwignia 17 służąca do obrotu stolika między punktem wcisku a punktem obserwacji. Układ blokowany za pośrednictwem śruby 28.



Rys. 2.3. Mikrotwardościomierz PMT-3

- 3) Układ zasilania oraz regulacji mikrotwardościomierza PMT-3 w światło za pośrednictwem zasilacza 19, składający się z żarówki 6V 15W osadzonej w kołnierzu 26, zestawu kolorowych przesłon 27, przesłony regulującej natężenie światła uruchamianej dźwignią 29, układu regulacji pracy jasnej i ciemnej 23. Ustawienie zestawu regulowane za pośrednictwem śrub 12 i 30.
- 4) Układu pomiarowo – obciążeniowego, zbudowanego z osadzenia wgłębnika wraz ze śrubą mocującą 21, pokrętła odpowiedzialnego za mocowanie 20, dźwigni załączającej oraz wyłączającej obciążenie pomiarowe umieszczone w punkcie 24.



Rys. 2.4. Mikrotwardościomierz PMT-3; widok stolika pomiarowego wraz z próbką i mechanizmu obciążeniowego

- 5) Układu odczytu wyników pomiarów w postaci mikromierza optycznego MOW 1-1-15x 6, mocowanego do mikroskopu za pośrednictwem śruby mocującej 8 oraz wyposażonego w śrubę mikrometryczną 7 służącą do ruchu siatki krzyżowej wewnątrz przyrządu. Po zamocowaniu ustawienie mikromierza MOW 1-1-15x reguluje się za pośrednictwem śruby mocującej 9.
- 6) Podstawy 1 i kolumny 2.

2.4. Program ćwiczenia

W programie badań przyjęto następujące czynniki badane:

- bezpośrednio
 - w – liczba odczytanych działek wzornika,
 - a – liczba działek zaobserwowana w obiektywie mikrometru optycznego,
 - I – współrzędna prawego skrajnego wierzchołka, mm,
 - II – współrzędna lewego skrajnego wierzchołka, mm,
 - P – wartość obciążenia, N.
- pośrednio
 - ϵ – współczynnik rzeczywistego wymiaru przedmiotu,
 - d_{rz} – rzeczywista długość przekątnej, mm,
 - μHV – wartość mikrotwardości Vickersa, HV.

Czynnikiem zmiennym jest:

- rodzaj badanego tworzywa (minimum trzy rodzaje tworzywa).

Czynnikami stałymi są elementy konstrukcyjne mikrotwardościomierza.

Czynniki zakłócające, których wpływ jest pomijalnie mały, to przede wszystkim niestabilność prądu elektrycznego, zmiany temperatury otoczenia, wilgotności tworzywa wejściowego oraz wilgotności względnej powietrza.

2.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

Przygotowanie próbek

W celu pomiaru mikrotwardości zaleca się uprzednie przygotowanie próbek. Polega ono na poprawie własności warstwy wierzchniej poprzez usunięcie wszelkich defektów struktury powierzchni. Założony cel osiąga się poprzez polerowanie lub oddziaływanie na przygotowywaną próbkę cieczy aktywnych.

Wykonanie pomiarów

Po przygotowaniu próbki do badań zostaje umieszczona na stole pomiarowym oraz zamocowana na nim. Kolejnym krokiem jest ustalenie wysokości mikroskopu nad próbką. Służą ku temu:

- Nakrętka (rys. 2.3 element 5) nakręcona na gwint kolumny regulująca wysokość korpusu mikroskopu w największym zakresie, blokowana śrubą ustalającą z pokrętłem (rys. 2.3 element 4),
- Pokrętło (rys. 2.3 element 6) regulujące wysokość korpusu mikroskopu oraz ostrość obrazu, blokowane nakrętką blokującą (rys. 2.3 element 8),
- Bęben śruby mikrometrycznej (rys. 2.3 element 7) odpowiedzialny za ostrość obrazu widzianego mikroskopem, blokowany nakrętką blokującą (rys. 2.3 element 8),
- Gdy ustawiona ostrość umożliwia dostrzeżenie ostrego obrazu struktury badanego przedmiotu można przystąpić do pomiarów mikrotwardości.

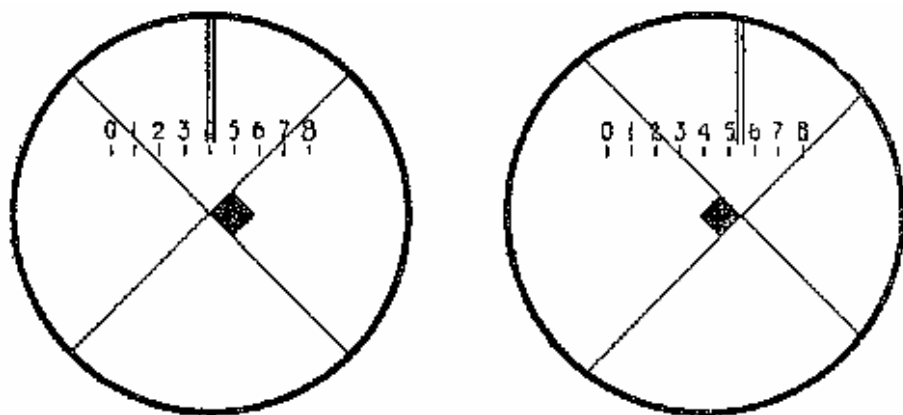
Po umieszczeniu, zamocowaniu oraz ustawieniu ostrości względem badanej próbki należy po uprzednim zwolnieniu śruby ustalającej (rys. 2.3 element 14) obrócić stolik pomiarowy za pomocą uchwyty (rys. 2.3 element 5) zlokalizowanego po jego lewej stronie. Gdy stolik zostanie obrócony o 180° , badany punkt będzie się znajdował pod wgłębnikiem. Kolejnym etapem jest ustalenie wartości obciążenia pomiarowego. Obciążenie załącza się za pośrednictwem dźwigni, która opuszcza oraz dociska wgłębnik do badanego materiału. Zmian obciążenia można dokonać w czasie 15 s. Po upływie 30 s od ustalenia obciążenia pomiarowego za pośrednictwem dźwigni obciążenie zostaje zdjęte z badanej próbki, natomiast wgłębnik podnosi się na poprzednią wysokość. Następnie po ponownym odwróceniu stołu pomiarowego należy przeprowadzić pomiar odcisku za pośrednictwem mikrometru optycznego MOW 1-1-15x. Odcisk pomiarowy należy wyśrodkować w okularze, po czym wyznaczyć współrzędne przeciwnych wierzchołków. Otrzymane wartości długości przekątnych należy uśrednić.

Pomiar rozpoczyna się od wyznaczenia współczynnika ε . Współczynnik ε określa rzeczywisty wymiar obserwowanego przedmiotu względem wymiarów zmierzonych za pośrednictwem układu optycznego mikroskopu oraz mikromierza optycznego MOW 1-1-15x. Wymaga to umieszczenia płytki wzorcowej mającej wygrawerowany wzór w postaci 1 mm podzielonego na 100 μm na stoliku pomiarowym. Następnym krokiem jest ułożenie podziałki mikromierza w taki sposób, by z wartością 0 w ośmiodziałowej skali przyrządu MOW 1-1-15x pokrywała się lewa skrajna podziałka wzornika. Po wykonaniu uprzedniej czynności należy zliczyć ilość działek, jakie znajdują się między skrajnymi wartościami 0 i 8 na mikromierzu optycznym. Otrzymaną liczbę działek podstawia się do wzoru:

$$\varepsilon = \left(\frac{w}{a \cdot 100} \right) \quad (2.4)$$

gdzie: w – liczba odczytanych działek wzornika, a – liczba działek zaobserwowana w obiektywie mikrometru optycznego.

Po wyznaczeniu ε można przystąpić do właściwych pomiarów mikrotwardości. Na wstępie próbkę umieszcza się pod obiektywem mikroskopu w celu wybrania punktu pomiarowego oraz wyostrenienia obrazu. Następnie po zwolnieniu śruby blokującej za pośrednictwem dźwigni umieszczone po lewej stronie stolika obraca się stół aż do momentu, gdy próbka znajdzie się pod wgłębnikiem. Kolejnym krokiem jest wybranie obciążenia pomiarowego oraz umieszczenie go w wyznaczonym miejscu. Obciążenie załącza się za pośrednictwem dźwigni. Istnieje możliwość zmiany obciążenia w czasie do 15 s. Po 30 s od czasu rozpoczęcia obciążania należy za pośrednictwem tej samej dźwigni wyłączyć obciążenie pomiarowe, odwrócić stolik do poprzedniego ustawienia oraz przystąpić do pomiarów optycznych.



Rys. 2.5. Schemat pomiaru odcisku powstałego na wskutek obciążenia wgłębnika

Po wyostrzeniu obrazu pozornego oraz ustawieniu próbki w środku pola widzenia należy ustawić siatkę krzyżową w sposób zaprezentowany na rys. 2.5 po prawej stronie. Współrzedną określamy jako wartość (zaokrągloną do dołu) całkowitą wartość liczbową wskazaną przez dwie pionowe kreski widoczne na rysunku 2.6. Resztę odczytujemy z bębna śruby mikrometrycznej urządzenia MOW 1-1-15x. Po zapisaniu współrzędnych wierzchołka przesuwamy siatkę krzyżową za pośrednictwem śruby mikrometrycznej do przeciwległego wierzchołka jak na rys. 2.6 po lewej stronie. Po przeprowadzeniu analogicznego odczytu jak dla pierwszego przypadku istnieje możliwość otrzymania pozornej długości przekątnej poprzez odjęcie wskazania I wobec wskazania II. Rzeczywistą długość przekątnej d_{rz} oblicza się ze wzoru:

$$d_{rz} = (I - II) \cdot \varepsilon \quad (2.5)$$

Otrzymaną wartość podstawia się do równania 2.2. W przypadku wyraźnej asymetrii odcisku należy przeprowadzić pomiar drugiej przekątnej, a następnie wartość d_{rz} uśrednić.

2.6. Wyniki, sprawozdanie

Wyniki pomiarów i badań należy zestawić w tabeli. Interpretację graficzną wyników prowadzonych badań dla różnych rodzajów próbek przedstawić w formie wykresów blokowych. Prawdłowo sporządzone sprawozdanie powinno zawierać: cel ćwiczenia, przebieg ćwiczenia, wyniki pomiarów i obliczeń zestawione w tabeli, wnioski wynikające z przeprowadzonego ćwiczenia.

Literatura

- [1] Broniewski T., *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [2] Ciszewski A., Radomski T., Szummer A., *Badania własności i materiałów mikrostruktury*, Oficyna wydawnicza PW, Warszawa 2000.
- [3] Sikora R., *Tworzywa wielkocząsteczkowe, Rodzaje, właściwości i struktura*, Wydawnictwo Uczelniane PL, Lublin 1991.
- [4] Żuchowska D., *Polimery konstrukcyjne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [5] PN-EN ISO 6507-1:1999. *Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Metoda badań.*
- [6] PN-79/H-04361. *Pomiar twardości metali sposobem Vickersa przy obciążeniu poniżej 9,81N.*

Politechnika Lubelska Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych Laboratorium:			
Temat ćwiczenia: Mikrotwardość		Nr ćwiczenia	Data wykonania
Nazwisko i imię	Ocena	Grupa	Semestr
			Rok akademicki

1. Cel ćwiczenia

2. Charakterystyka badań

3. Przebieg ćwiczenia

4. Wyniki

Lp.	Rodzaj próbki	w	a	ε	I , mm	II , mm	d_{rz} , mm	P , N	μHV , HV
1									
2									
3									
4									
5									

μHV					

Rodzaj próbki

5. Wnioski

Data Podpis

3. Wytrzymałość na rozciąganie

3.1. Wiadomości wstępne

Badania właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu tworzyw są jednym z podstawowych źródeł wiadomości o mechanicznych właściwościach tworzyw. Są też często stosowane do pośredniej oceny i badań innych właściwości oraz jakości tworzyw. Otrzymane wyniki wykorzystuje się na przykład przy doborze właściwego tworzywa podczas projektowania wytworów.

Charakterystykę zachowania się tworzywa podczas rozciągania dobrze przedstawia tak zwany wykres rozciągania, uzyskiwany w trakcie próby jednoosiowego rozciągania, który przedstawia przebieg zależności między dwiema zmiennymi: naprężeniem i odkształceniem lub obciążeniem i wydłużeniem. Kształt wykresu zależy głównie od rodzaju materiału, a podstawową właściwością tworzyw jest mały zakres prostoliniowości tej zależności.

Rozciąganie tworzyw umożliwia wyznaczanie następujących cech wytrzymałościowych:

- granica sprężystości,
- granica plastyczności lub umowna granica plastyczności,
- największe naprężenie rozciągające (wytrzymałość na rozciąganie),
- naprężenie zrywające,
- wydłużenie względne przy granicy sprężystości, plastyczności,
- wydłużenie względne przy największym naprężeniu rozciągającym,
- wydłużenie względne przy zerwaniu,
- współczynnik sprężystości wzdłużnej.

Próba rozciągania jest znormalizowana [4] i polega na jednoosiowym odkształceniu odpowiednio przygotowanych próbek oraz mierzeniu powstających sił. Wielkościami mierzonymi bezpośrednio podczas pomiaru są odkształcenia oraz siła odkształcająca.

Wydłużenie bezwzględne Δl_B przy zerwaniu wyznaczamy zgodnie z zależnością:

$$\Delta l_B = l_B - l_0, \text{ mm} \quad (3.1)$$

gdzie: l_0 – początkowa długość odcinka pomiarowego [mm], l_B – końcowa długość odcinka pomiarowego [mm].

Wydłużenie względne ε_B przy zerwaniu obliczamy zgodnie z równaniem:

$$\varepsilon_B = \frac{\Delta l_B}{l_0} 100, \% \quad (3.2)$$

gdzie: Δl_B – wydłużenie bezwzględne [mm], l_0 – początkowa długość odcinka pomiarowego [mm].

Naprężenie σ_B przy zerwaniu należy określić według wzoru :

$$\sigma_B = \frac{F_B}{A}, \text{ N/mm}^2 \quad (3.3)$$

gdzie: F_B – siła przy zerwaniu [N], A – powierzchnia początkowego przekroju poprzecznego próbki [mm²].

Wydłużenie bezwzględne Δl_M przy maksymalnym naprężeniu należy wyznaczyć z zależności:

$$\Delta l_M = l_M - l_0, \text{ mm} \quad (3.4)$$

gdzie: l_0 – początkowa długość odcinka pomiarowego [mm], l_M – końcowa długość odcinka pomiarowego [mm].

Wydłużenie względne ε_M przy maksymalnym naprężeniu obliczamy według równania:

$$\varepsilon_M = \frac{\Delta l_M}{l_0} 100, \% \quad (3.5)$$

gdzie: Δl_M – wydłużenie bezwzględne przy maksymalnym naprężeniu [mm], l_0 – początkowa długość odcinka pomiarowego [mm].

Wytrzymałość na rozciąganie σ_M obliczamy zgodnie z równaniem :

$$\sigma_M = \frac{F_M}{A}, \text{ N/mm}^2 \quad (3.6)$$

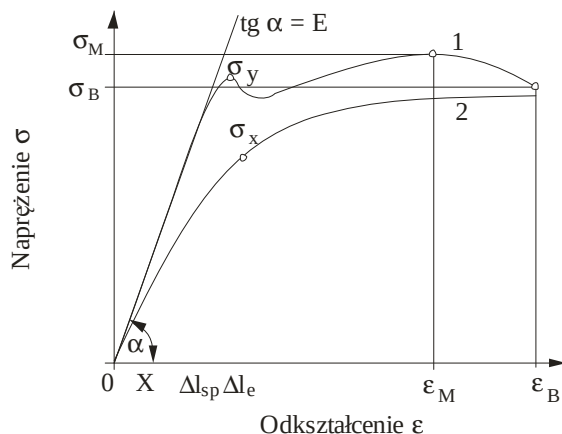
gdzie: F_M – maksymalna siła odkształcająca, A – powierzchnia początkowego przekroju poprzecznego [mm²].

W tworzywach poddawanych rozciąganiu naprężenia wzrastają początkowo proporcjonalnie do odkształceń, zgodnie z prawem Hooke’a.

Moduł Younga (E) – inaczej współczynnik sprężystości wzdłużnej – jest to wielkość określająca sprężystość materiału. Wyraża ona, charakterystyczną dla danego materiału, zależność względnego odkształcenia liniowego ε materiału od naprężenia σ , jakie w nim występuje w zakresie odkształceń sprężystych.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \text{ N/mm}^2 \quad (3.7)$$

gdzie: $\bar{\sigma}_1$ – naprężenie przy wydłużeniu względnym ε_1 , $\bar{\sigma}_2$ – naprężenie przy wydłużeniu względnym ε_2 , ε_1 – odkształcenie o wartości = 0,0005, ε_2 – odkształcenie o wartości = 0,0025



Rys. 3.1. Zależność naprężenia w funkcji odkształcenia podczas rozciągania tworzyw: 1 – z wyraźną granicą plastyczności, 2 – bez wyraźnej granicy plastyczności, σ_x – umowna granica plastyczności (naprężenie przy x% odkształceniu), σ_y – granica plastyczności

Charakterystykę zachowania się tworzywa podczas rozciągania przedstawiono na rys. 3.1. Jest to wykres, uzyskiwany w trakcie próby rozciągania, który przedstawia przebieg zależności między dwiema zmiennymi: naprężeniem i odkształceniem.

Największe naprężenie do którego tworzywo poddane rozciąganiu zachowuje się zgodnie z prawem Hooke'a, nosi nazwę granicy plastyczności (punkt σ_y). Przy dalszym rozciąganiu wzrostowi odkształcenia towarzyszy powolniejszy wzrost naprężeń. Wykres rozciągania odchyła się od prostej, w tym obszarze odkształceń pojawiają się odkształcenia trwałe (plastyczne), takie które nie cofają się po usunięciu obciążenia. Obciążenia trwałe pojawiają się po przekroczeniu pewnego naprężenia zwanego granicą plastyczności. W badaniach operuje się najczęściej umowną granicą plastyczności, czyli naprężeniem, które wywołuje w próbce pewne umownie ustalone odkształcenie trwałe – najczęściej 0,2% początkowej długości odcinka pomiarowego.

Po osiągnięciu pewnej wartości siły, siła rozciągająca nie tylko nie wzrasta, ale może nawet chwilowo zmniejszać się. Takie zachowanie się tworzywa jest określane jako płynięcie. Występujące tutaj największe naprężenie przy przegięciu krzywej, nazywa się granicą plastyczności tworzywa. Tworzywa mogą mieć również łagodnie narastające odkształcenie i w tym przypadku wprowadza się pojęcie umownej granicy plastyczności, którą jest naprężenie wywołujące w tworzywie umownie przyjęte odkształcenie względne wynoszące 1%.

W dalszej fazie próby rozciągania można zauważyć wzrost siły rozciągającej towarzyszący wzrostowi wydłużenia wywołany wzmocnieniem tworzywa, zwłaszcza widoczne jest to dla tworzyw częściowo krystalicznych. Z chwilą osiągnięcia maksymalnej wartości siły, w pewnym miejscu tworzywa pojawia się gwałtowne przewężenie, zwane szyjką. Naprężenie odpowiadające największej wartości siły rozciągającej jest zdefiniowane jako wytrzymałość na rozciąganie. Pole przekroju poprzecznego w miejscu przewężenia maleje tak szybko, że pomimo stałej prędkości rozciągania, obserwuje się spadek siły rozciągającej. W pewnym momencie następuje pęknięcie tworzywa, na ogół w środku szyjki.

O wytrzymałości na rozciąganie tworzywa decydują siły międzycząsteczkowe oraz siły wiązań chemicznych, a jego wytrzymałość wzrasta w miarę zwiększania się stopnia polimeryzacji polimeru do chwili zrównania wartości sił Van der Waalsa z siłami wewnątrzcząsteczkowymi.

Właściwości wytrzymałościowe tworzyw zależą w sposób znaczący od temperatury. Ze wzrostem temperatury powiększa się ruchliwość makrocząstek a zmniejszające się siły wewnątrzcząsteczkowe powodują spadek granicy sprężystości, naprężenia zrywającego oraz współczynnika sprężystości wzdłużnej, ale jednocześnie wzrasta wydłużenie przy zerwaniu. Z drugiej jednak strony, podczas odkształcania tworzywa wykonywana jest praca, która ulega dysypacji, głównie na energię cieplną. Generujące się ciepło może być tak znaczne, że tworzywo osiąga temperaturę, w której zachodzą znaczące przemiany strukturalne, głównie rekryształizacja, powodująca efekt wzmocnienia tworzywa.

Aparatura pomiarowa do badań wytrzymałości na rozciąganie

Do badań wytrzymałości na rozciąganie stosowane są maszyny wytrzymałościowe które dzięki swojej uniwersalności służą do pomiarów wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie i zginanie. Ze względu na przeznaczenie, rodzaj badanego materiału oraz stosowane obciążenie badawcze maszyny wytrzymałościowe dzielimy na jednokolumnowe oraz dwukolumnowe.

Maszyny wytrzymałościowe jednokolumnowe (rys. 3.2) są dostępne w zakresie obciążeń badawczych od 1 N do 5 kN. Prędkość rozciągania może być zadawana w zakresie od 0,0005 do 3000 mm/min, w zależności od modelu maszyny. Sterowanie położeniem, siłą oraz odkształceniem w zależności od wymagań może być dowolnie zadawane. Maszyny te znajdują zastosowanie w laboratoriach badawczo-rozwojowych, jak i działach zapewnienia jakości.

W maszynach tego typu istnieje możliwość regulacji sterowania dla potrzeb badania niestandardowych materiałów, na przykład kompozytów, materiałów ceramicznych. Zarówno do rozciągania jak i do ściskania oraz zginania stosuje się te same urządzenia pomiarowe wymieniając jedynie uchwyty, których przykłady pokazano na rys. 3.4. Ważne jest także zastosowanie odpowiednich rodza-

jów uchwytów tak, aby próbka nie ulegała zerwaniu w miejscu chwytu tylko w części przewężonej.



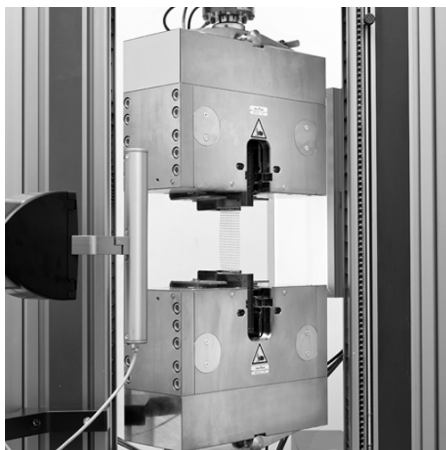
Rys.3.2. Maszyny wytrzymałościowe jednokolumnowe, przykłady: a) Instron 3340 b) Zwick Z2,5 [www.instron.com, www.zwick.com]

Maszyny dwukolumnowe (rys. 3.3) są to urządzenia podłogowe w których zakres obciążeń badawczych wynosi od 5 kN do 300 kN. Wytwarzane są również maszyny na specjalne zamówienia mające obciążenie badawcze nawet do 2000 kN. Prędkość rozciągania może być zadawana również w zakresie od 0,0005 do 3000 mm/min, w zależności od modelu maszyny. System sterowania napędem maszyny, gwarantuje kontrolę w funkcji siły lub wydłużenia podczas testów. Układy sterująco-pomiarowe synchronicznie próbują wszystkie kanały pomiarowe i umożliwiają przesyłanie wyników pomiarowych do oprogramowania w czasie rzeczywistym z częstotliwością 500 Hz. Maszyny te mają wiele zalet są nimi np. możliwość obsługi poprzez kolorowy panel z bezpośrednim zarządzaniem danymi, bez stosowania dodatkowo stanowiska komputerowego.

Najważniejsze w maszynach podłogowych są: duża, uniwersalna przestrzeń badawcza, duża sztywność ramy obciążeniowej oraz przestawne sztywne trawersy do ergonomicznego ustawienia przestrzeni badawczej. Maszyny są wyposażone również w specjalistyczne głowice pomiarowe siły, które są zaprojektowane by umożliwiać rozszerzony zakres pomiarowy siły i niezmiennie wysoką odporność na nie osiowe obciążenia.



Rys. 3.3. Maszyny wytrzymałościowe podłogowe, dwukolumnowe firm: a) Instron b) Shimadzu [www.instron.com, www.shimadzu.com]



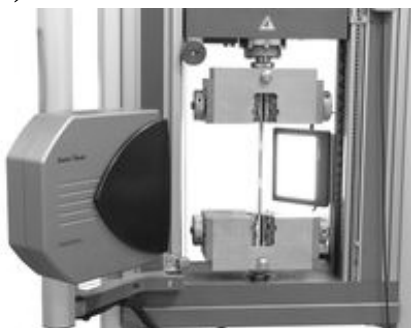
Rys. 3.4. Przykłady uchwytów mocujących do badania wytrzymałości na rozciąganie [www.zwick.com]

Bardzo ważnym elementem maszyny, na której będzie prowadzona próba rozciągania jest jej główny element pomiarowy – ekstensometr. Jest to przyrząd służący do pomiaru i rejestracji odkształceń próbki występujących podczas rozciągania, ściskania lub zginania. W zależności od wyposażenia laboratorium, rodzaju badanego materiału i wymaganej dokładności można spotkać ekstensomet-

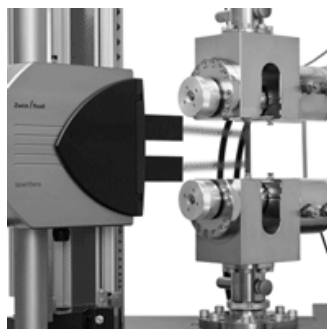
metry o różnych poziomach rozdzielczości, zasadach pomiaru i drodze pomiarowej. Podstawowym rozróżnieniem pomiędzy ekstensometrami jest dotykowy lub bezdotykowy pomiar odkształceń. Główną zaletą ekstensometrów bezdotykowych jest możliwość stosowania do zrywania próbek bez ryzyka uszkodzenia nawet do tworzywa cechujących się bardzo dużym naprężeniem zerwania. W przypadku tych ekstensometrów mamy do czynienia z pośrednim pomiarem odkształcenia, a zakres pomiarowy ograniczony jest ich polem widzenia, które jest niezmiennie.

Przykłady ekstensometrów bezdotykowych przedstawione są na rys. 3.5 i 3.6.

a)



b)



Rys. 3.5. Ekstensometry bezdotykowe firmy Zwick: a) ekstensometr laserowy, b) video ekstensometr [www.zwick.com]

a)



b)



Rys. 3.6. Ekstensometry bezdotykowe firmy Instron: a) ekstensometr do badania folii, b) video ekstensometr [www.instron.com]

Na wynik pomiarów oraz badań wytrzymałości na rozciąganie mają wpływ ponadto:

- kształt i wielkość próbek – nie powinny być skręcone; powinny mieć wzajemnie prostopadłe pary równoległych powierzchni; naroża nie powinny mieć zadrapań, nierówności, powinny być gładkie,

- temperatura i wilgotność otoczenia – ze wzrostem temperatury zwiększa się ruchliwość makrocząsteczek, a zmniejszające się siły wewnątrzcząsteczkowe powodują spadek granicy sprężystości, naprężenia zrywającego, oraz współczynnika sprężystości wzdłużnej,
- sposób przygotowania próbek – próbki powinny być klimatyzowane przez co najmniej 16 h w temperaturze 23 ± 2 °C i wilgotności względnej $50 \pm 5\%$.

3.2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie metod badań wytrzymałości na rozciąganie tworzyw polimerowych. Celem ćwiczenia jest również wyznaczenie wybranych właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu, wytworów z tworzyw polimerowych.

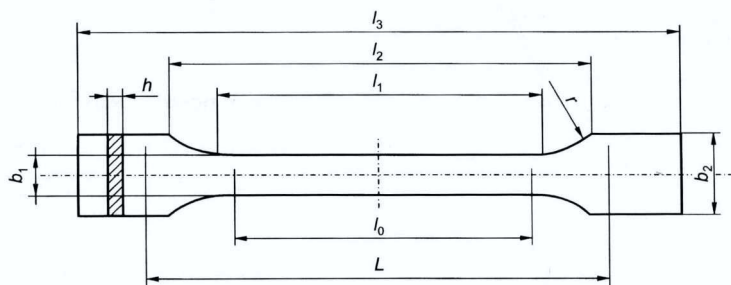
3.3. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze obejmuje następujące elementy:

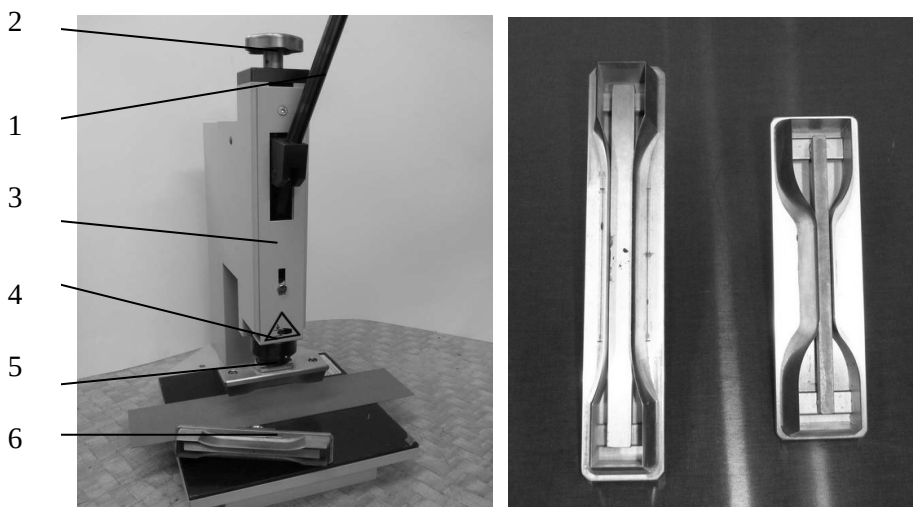
- prasę ręczną z wykrojnikiem do wycinania próbek do badań wytrzymałościowych,
- maszynę wytrzymałościową z oprzyrządowaniem.

Do pomiaru stosuje się trzy rodzaje próbek, których kształt i wymiary podano na rysunku 3.7 oraz w tablicy 3.1.

Rodzaj próbki, sposób przygotowania, grubość i prędkość rozciągania zależą od rodzaju tworzywa i jego postaci. Na przykład, dla arkuszy tworzywa, których współczynnik sprężystości przy zginaniu wynosi nie mniej niż 700 MPa, stosuje się próbki rodzaju I, które uzyskuje się metodą obróbki plastycznej z naruszeniem spójności tworzywa – wykrawaniem i stosuje prędkość rozciągania 100 lub 200 mm/min. Natomiast, dla tworzyw termoplastycznych w postaci granulatu, korzysta się z próbek rodzaju II, otrzymując je metodą przetwórstwa – wtryskiwaniem i stosuje się prędkość rozciągania 2, 5, 20, 50 lub 100 mm/min. Próbki można również przygotować innymi metodami przetwórstwa tworzyw na przykład prasowaniem lub jedną z metod obróbki skrawaniem. Próbki pomiarowe należy przygotować tak, aby nie wykazywały anomalii powierzchniowych i materiałowych. Do pomiaru przygotowuje się pięć próbek tworzywa, które klimatyzuje się co najmniej 16 godzin w temperaturze 23 ± 2 °C i wilgotności względnej powietrza $50 \pm 5\%$.



Rys. 3.7. Kształt i oznaczenia wymiarów charakterystycznych dla próbki rodzaju 1A/1B/1BA/1BB do badań właściwości wytrzymałościowych przy statycznym rozciąganiu



Rys. 3. 8. Wygląd prasy ręcznej do wycinania próbek Zwick ZCP 020 wraz z wykrojnikami; 1 – dźwignia napędowa, 2 – pokrętko regulacji wysokości, 3 – głowica tnąca, 4 – popychacz głowicy, 5 – wykrojek próbek rodzaju 5A, 6 – wykrojek próbek rodzaju 1A

Do wycinania próbek pomiarowych otrzymanych z wytłoczonej taśmy należy zastosować specjalistyczną prasę do wycinania próbek Zwick ZCP 020.

Prasa ręczna, której elementy składowe zostały pokazane na rysunku 3.8, ma zamontowany wykrojek służący do wycinania próbek pomiarowych w kształcie wiosełek i wymiarach zgodnych z odpowiednią normą, określającą wymagania dotyczące kształtu i wymiarów próbek do badań wytrzymałości na rozciąganie [4].

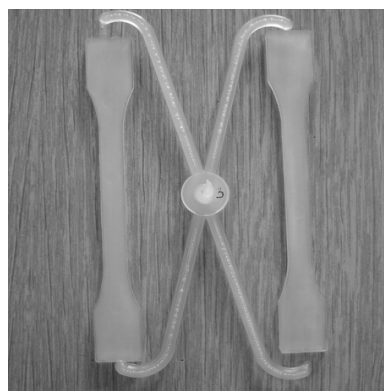
Pokazana na rysunku prasa do próbek ma ręczny dźwigniowy układ napędowy. Odległość między podkładką a popychaczem może być zmieniana w zakresie 105–155 mm, maksymalna siła tnąca wynosi 20 kN, zaś skok popychacza prasy = 41 mm.

Tabela 3.1

Wartości wymiarów charakterystycznych poszczególnych rodzajów próbek

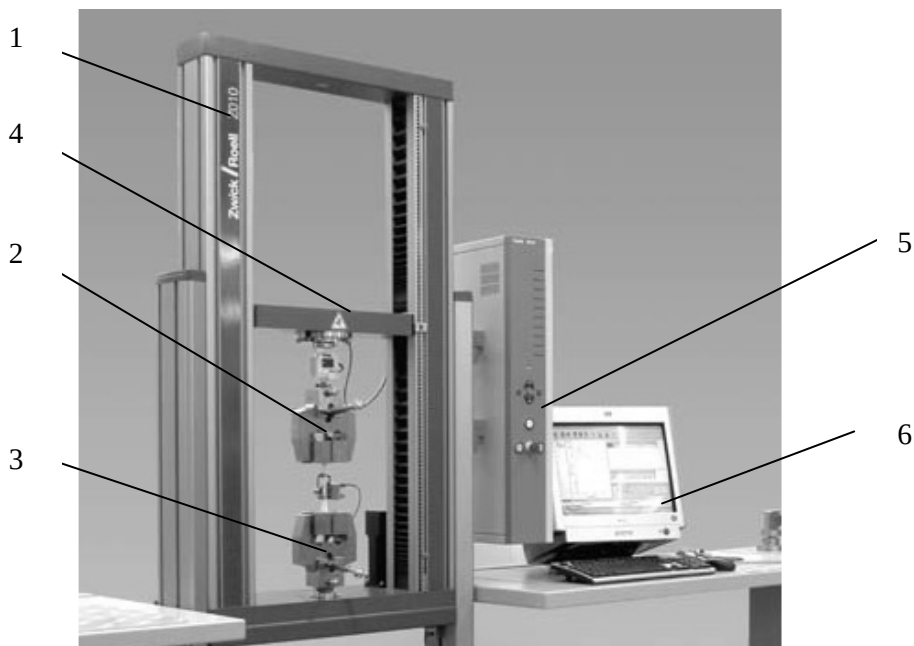
Wielkość	Rodzaj próbki			
	1A	1B	1BA	1BB
	Wymiar, mm			
Długość całkowita, l_3	150	150	75	30
Długość części ograniczonej liniami równoległymi, l_1	80 ± 2	$60 \pm 0,5$	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$
Promień, r	20-25	60	30	12
Odległość między szerokimi równoległymi usytuowanymi częściami, l_2	104–113	106–120	58 ± 2	23 ± 2
Szerokość części pomiarowej, b_2	$20 \pm 0,2$	$20 \pm 0,2$	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
Szerokość części mocowanej w uchwytach, b_1	$10 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$5 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$
Grubość, g	$4 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$	2	2
Długość odcinka pomiarowego, l_0	$50 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
Początkowa odległość między uchwytami, L	115 ± 1	l_{20}^{+5}	l_{20}^{+2}	l_{20}^{+1}

Natomiast, dla tworzyw termoplastycznych w postaci granulatu, korzysta się z próbek rodzaju 1, otrzymując je metodą przetwórstwa – wtryskiwaniem i stosując prędkość rozciągania 2, 5, 20, 50 lub 100 mm/min.



Rys. 3.9. Wygląd próbek rodzaju 1A wykonanych metodą wtryskiwania przy zastosowaniu formy wtryskowej dwugniazdowej

Wyznaczanie właściwości wytrzymałościowych tworzyw przy statycznym rozciąganiu przebiega przy zastosowaniu maszyny wytrzymałościowej firmy Zwick Z010 (rys. 3.10).

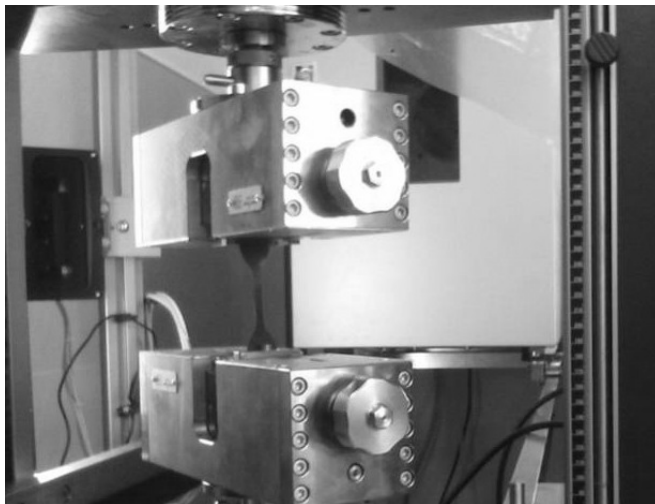


Rys. 3.10. Wygląd maszyny wytrzymałościowej Zwick Z010 wraz z oprzyrządowaniem podczas statycznego rozciągania tworzyw: 1 – rama stalowa, 2 – uchwyt górny, 3 – uchwyt dolny, 4 – ruchoma poprzeczka, 5 – zespół sterowniczy, 6 – stanowisko komputerowe

Maszyna wytrzymałościowa składa się z układu rozciągającego, (obejmującego ramę stalową, dwa uchwyty, ruchomą poprzeczkę), urządzenia do pomiaru obciążenia rozciągającego działającego na próbkę oraz ekstensometru. Próbkę tworzywa mocuje się w nieruchomym uchwycie górnym (2) maszyny, przytwierdzonym do ramy oraz w uchwycie dolnym (3), zamocowanym do ruchomej poprzeczki (4), przesuwającej się wzdłuż ramy (1).

Do elektronicznego sterowania działaniem maszyny jest wykorzystywany zespół sterowniczy (5) oraz stanowisko komputerowe (6). Działaniem układu rozciągającego steruje komputer, zaś odpowiednie oprogramowanie i oprzyrządowanie maszyny umożliwia przeprowadzenie nie tylko próby rozciągania, ale również ściskania, zginania, zmęczenia, pełzania itp. Maszyna wytrzymałościowa Zwick zapewnia działanie z maksymalną siłą rozciągającą do 10 kN i prędkością rozciągania do 200 mm/min. Przy zastosowaniu odpowiednich komór termicznych pomiary można wykonywać w różnej temperaturze. Uchwyt dolny ma możliwość przesunięcia się względem uchwytu górnego na odległość do 1757 mm.

Próbki tworzywa umieszcza się w uchwytach (rys. 3.11) maszyny wytrzymałościowej i w czasie pomiaru, przy wzrastającym obciążeniu, rejestruje się w sposób ciągły zarówno obciążenie, jak i wydłużenie odcinka pomiarowego próbki. Z uzyskanej krzywej w układzie siła – wydłużenie, odczytuje się wartości charakterystyczne i przy ich pomocy wyznacza cechy wytrzymałościowe tworzywa. Odpowiednie oprogramowanie umożliwia bezpośrednią wizualizację zależności naprężenie od odkształcenia i wszystkich cech wytrzymałościowych na ekranie monitora.



Rys. 3.11. Wygląd uchwytów mocujących maszyny wytrzymałościowej Z10 wraz z widoczną rozciąganą próbką rodzaju 5A

3.4. Program ćwiczenia

W programie badań przyjęto jako czynniki badane:

1) bezpośrednio

- powierzchnię przekroju poprzecznego próbki do badań wytrzymałościowych, A , mm,
- maksymalną siłę rozciągającą, F_M , N,
- siłę przy której próbka uległa zerwaniu, F_B , N,
- zmianę długości odcinka pomiarowego próbki w chwili zerwania Δl_B , mm,
- zmianę długości odcinka pomiarowego próbki przy maksymalnej sile rozciągającej, Δl_M , mm.

2) pośrednio

- wytrzymałość na rozciąganie (maks. naprężenie rozciągające), σ_M , N/mm²,

- napężenie przy zerwaniu, σ_B , N/mm²,
- odkształcenie względne przy zerwaniu, ε_B , %,
- odkształcenie względne przy maksymalnym napężeniu rozciągającym, ε_M , %.

Czynnikiem zmiennym jest:

- rodzaj badanego tworzywa (minimum dwa rodzaje tworzywa lub jeden rodzaj tworzywa z napełniaczami),
- warunki technologiczne otrzymywania wyrobów w procesie wytłaczania lub wtryskiwania.

Czynnikami stałymi są:

- wielkość wykrojnika zamontowanego w prasce do wycinania próbek,
- elementy konstrukcyjne maszyny wytrzymałościowej,
- warunki pomiarowe (zakres siły rozciągającej, prędkość rozciągania) podczas prowadzenia badań właściwości wytrzymałościowych.

Czynniki zakłócające, których wpływ jest pomijalnie mały, to przede wszystkim niestabilność prądu elektrycznego, zmiany temperatury otoczenia, wilgotności tworzywa wejściowego oraz wilgotności względnej powietrza.

3.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

W celu prawidłowego wykonania ćwiczenia należy przeprowadzić następujących czynności:

- 1) Przygotować minimum 3 próbki dla każdego rodzaju tworzywa, w postaci wiosełek do badań wytrzymałościowych przy rozciąganiu, otrzymanych w procesie wtryskiwania lub wyciętych przy pomocy prasy ręcznej wyposażonej w odpowiedni wykrojnik.
- 2) Określenie właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu, należy wykonać przy zastosowaniu maszyny wytrzymałościowej wraz z niezbędnym oprzyrządowaniem, zgodnie z odpowiednią normą: PN-EN ISO 527:1998. Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu.

Wyznaczając cechy wytrzymałościowe przy statycznym rozciąganiu wykonać trzeba następujące czynności:

- 1) Nanieść na wyciętych próbkach pomiarowych (wiosełkach) kreski ograniczające odcinek pomiarowy.
- 2) Zmierzyć grubość oraz szerokość odcinka pomiarowego próbek i na tej podstawie obliczyć powierzchnię początkową A przekroju poprzecznego próbek.
- 3) Zamocować pierwszą próbkę w uchwycie górnym i dolnym maszyny wytrzymałościowej.

- 4) Nastawić żadaną prędkość rozciągania i uruchomić maszynę wytrzymałościową, obserwując jednocześnie rejestrację wykresu obciążenia w funkcji wydłużenia aż do momentu zerwania próbki pomiarowej.
- 5) Wyznaczyć czynniki badane bezpośrednio i pośrednio, zgodnie z programem ćwiczenia.
- 6) Powtórzyć czynności dla pozostałych próbek, minimum 3 próbek dla każdego rodzaju tworzywa.

Naprężenie σ_B przy zerwaniu, wytrzymałość na rozciąganie, σ_M należy wyznaczyć z zależności 3.3 oraz 3.6 przedstawione w Ad.3.1 ćwiczenia. Pozostałe wielkości występujące we wzorach zgodne z obowiązującą normą, zostały opisane w programie ćwiczenia.

3.6. Wyniki, sprawozdanie

Wyniki pomiarów i badań należy zestawić w tabeli 1 oraz tabeli 2 zamieszczonej we wzorze sprawozdania. Interpretację graficzną wyników prowadzonych badań, wytrzymałości na rozciąganie i naprężenia przy zerwaniu od odkształcenia względnego, dla różnych rodzajów tworzyw przedstawić w formie wykresów blokowych.

Prawidłowo sporządzone sprawozdanie powinno zawierać: cel ćwiczenia, przebieg ćwiczenia, wyniki pomiarów i obliczeń właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu zestawione w tabelach, interpretację wyników w postaci wykresów blokowych, wnioski wynikające z przeprowadzonego ćwiczenia.

Literatura

- [1] *Dokumentacja techniczno-ruchowa maszyny wytrzymałościowej Zwick Z010*, Lublin 2013.
- [2] Sikora R., *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
- [3] Pielichowski J., Puszyński A., *Technologia tworzyw sztucznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- [4] PN-EN ISO 527:1998. *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu*.

Politechnika Lubelska Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych Laboratorium:			
Temat ćwiczenia: Wytrzymałość na rozciąganie		Nr ćwiczenia	Data wykonania
Nazwisko i imię	Ocena	Grupa	Semestr
			Rok akademicki

1. Cel ćwiczenia

2. Charakterystyka badań

3. Przebieg ćwiczenia

4. Wyniki

Tabela 1

Wyniki pomiarów wielkości mierzonych przy rozciąganiu

Lp.	Rodzaj tworzywa	Przekrój próbki A , mm ²	Maks. siła rozciągająca F_M , N	Wartość średnia $\overline{F_M}$, N	Siła przy zerwaniu próbki F_B , N	Wartość średnia $\overline{F_B}$, N
1						
2						
3						
1						
2						
3						
1						
2						
3						

Tabela 2

Wyniki obliczeń właściwości wytrzymałościowych przy rozciąganiu

Lp.	Wytrzymałość na rozciąganie σ_M , N/mm ²	Wartość średnia $\overline{\sigma_M}$, N/mm ²	Naprężenie przy zerwaniu σ_B , N/mm ²	Wartość średnia $\overline{\sigma_B}$, N/mm ²	Wartość średnia $\overline{\epsilon_B}$, %	Wartość średnia $\overline{\epsilon_M}$, %
1						
2						
3						
1						
2						
3						
1						
2						
3						

σ_B , MPa

ϵ_B , %

σ_M , MPa

ϵ_M , %

6. Wnioski

Data Podpis

4. Wytrzymałość na zginanie

4.1. Wiadomości wstępne

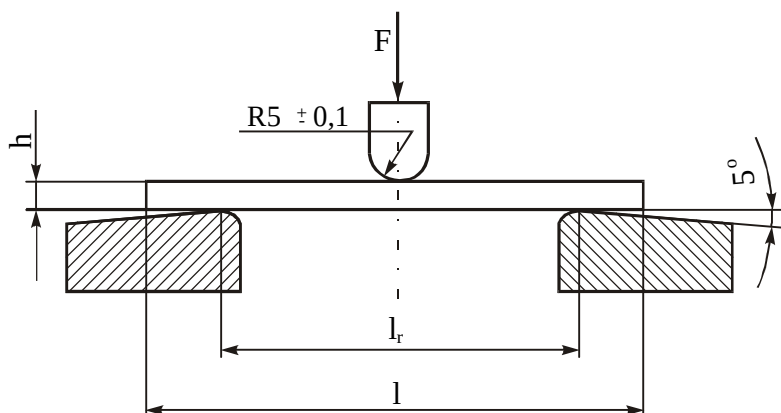
Wytrzymałość na zginanie jest poza wytrzymałością na rozciąganie i ściskanie jedną z ważniejszych właściwości konstrukcyjnych tworzyw polimerowych.

Zginanie występuje wówczas, gdy działające na belkę siły zewnętrzne prostopadłe do jej osi, można zastąpić wypadkową parą sił leżącą w płaszczyźnie przechodzącej przez jej oś. Moment tej pary sił jest momentem zginającym M_g w danym przekroju.

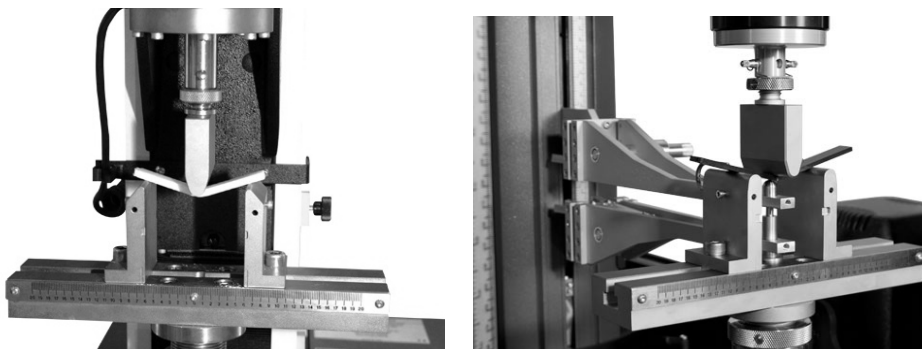
Próba zginania polega, na podparciu próbki tworzywa na końcach i obciążeniu punktowo, prostopadłe do jej osi podłużnej, oraz symetrycznie względem podpór. Odległość pomiędzy punktami podparcia musi być ściśle określona i jest znormalizowana [4]. Takie badanie stosuje się tylko do tworzyw kruchych (sztywnych), które pękają w czasie badania. Występujące naprężenia podczas zginania (naprężenia niszczące) w chwili zniszczenia próbki nazywa się wytrzymałością na zginanie σ_f .

Dla próbek jednorodnych rozkład naprężeń w funkcji ich wysokości ma charakter liniowy w zakresie odkształceń sprężystych (rys. 4.1). Po przekroczeniu tego zakresu warstwa obojętna próbki przemieszcza się w górę lub w dół, a zależność naprężenia od odkształcenia staje się krzywoliniowa.

Metodę tę stosuje się do nie napełnionych oraz wzmocnionych napełniaczami włóknistymi sztywnych tworzyw polimerowych, oprócz tworzyw porowatych.



Rys. 4.1. Schemat zginania próbki siłą skupioną, kształt podpór i trzpienia wywierającego nacisk na próbkę zginaną



Rys. 4.2. Rozkład naprężeń w zginanej belce wolnopodpartej – przykład zginania [www.instron.pl]

Podczas zginania pod wpływem przyłożonej siły F górna powierzchnia próbki ulega zmniejszeniu, natomiast dolna wydłużeniu, w wyniku czego w górnej części występują naprężenia ściskające, w dolnej rozciągające. W środkowej strefie naprężenia się kompensują. Tworzywa silnie odkształcalne nie nadają się do badania tą metodą, ponieważ się tak bardzo zginają, że dolna powierzchnia próbki przesuwa się na podporach, a powstające tarcie powoduje wzrost naprężeń rozciągających w dolnej strefie.

Zniszczenie próbki następuje z reguły w środkowej zwężonej części, w której z racji małego przekroju poprzecznego naprężenia są największe. Największemu odkształceniu ulega środkowy odcinek.

Odległość pomiędzy punktami podparcia musi być ściśle określona. Obciążenie F przykładają się symetrycznie względem podpór. Badanie stosuje się tylko do tworzyw kruchych, które pękają w czasie badania. Tworzywa silnie odkształcalne zginają się podczas badania tak, że dolna powierzchnia próbki przesuwa się na podporach, a powstające przy tym tarcie powoduje wzrost naprężeń rozciągających w dolnej strefie. Takie tworzywa można zginać tylko w ograniczonym zakresie. Podczas zginania pod wpływem siły F górna powierzchnia próbki ulega zmniejszeniu zaś dolna wydłużeniu, w wyniku czego w górnej części występują naprężenia ściskające, a w dolnej rozciągające.

Moment zginający M_g występujący w miejscu obciążenia siłą F jest określony wzorem:

$$M_g = \frac{F l_r}{4}, \text{ Nm} \quad (4.1)$$

w którym l_r jest rozstawem podpór, mm.

Wskaźnik wytrzymałości przekroju W w przypadku próbki o przekroju prostokątnym określa równanie w postaci:

$$W = \frac{b h^2}{6}, \text{ mm}^3 \quad (4.2)$$

w którym b jest szerokością próbki w mm, natomiast h jej wysokością mm.

Naprężenie zginające w próbce σ_f , wywołane siłą F , oblicza się po uwzględnieniu poprzednich zależności ze wzoru:

$$\sigma_f = \frac{M_g}{W} = \frac{3 F l_r}{2 b h^2}, \text{ MPa} \quad (4.3)$$

Odształcenie zginające można wyrazić jako stosunek bezwymiarowy lub w procentach ze wzorów:

$$\varepsilon_f = \frac{6 s h}{l_r^2} \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_f = \frac{600 s h}{l_r^2}, \% \quad (4.5)$$

w których s jest strzałką ugięcia w mm, h grubością próbki w mm, natomiast l_r jest rozstawem podpór w mm.

W celu wyznaczenia modułu sprężystości przy zginaniu należy obliczyć strzałki ugięcia s_1 i s_2 , które odpowiadają wartościom odkształcenia zginającego $\varepsilon_{f1}=0,0005$ i $\varepsilon_{f2}=0,0025$ stosując poniższe równanie:

$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi} l_r^2}{6 h} \quad (i = 1; 2) \quad (4.6)$$

gdzie: s_i – jedna ze strzałek ugięcia, mm, ε_{fi} - odpowiednia wartość odkształcenia zginającego, h – grubość próbki, mm, l_r – rozstaw podpór, mm.

Podczas zginania, jak podczas rozciągania i ściskania, można uzyskać wykres naprężenie – odkształcenie. Podczas zginania próbek z tworzyw sztucznych o smukłym kształcie nie zachodzą wyraźne zmiany w strukturze tworzywa. W tworzywach kruchych występują w materiale naprężenia ścinające, skierowane prostopadle do osi działania siły. Do opisu właściwości mechanicznych sztywnych tworzyw polimerowych, charakteryzujących się małymi odkształceniami, w czasie ściskania dogodniej jest stosować zginanie ze względu na występujące tu większe i łatwiejsze do zmierzenia strzałki ugięcia. Przyrost naprężeń jest wolniejszy niż podczas rozciągania lub ściskania, dzięki czemu łatwiej wyodrębnić zakres odkształceń sprężystych poniżej granicy proporcjonalności. Wyznaczenie modułu sprężystości jest wtedy szczególnie dogodne. Próbki wolnopodparte można w prosty sposób poddać kilkakrotnemu obciążeniu i odciążeniu, co ma również istotne znaczenie dla wyznaczania modułu sprężystości E .

Współczynnik sprężystości przy zginaniu oblicza się ze wzoru

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}, \text{ MPa} \quad (4.7)$$

w którym:

σ_{f1} – naprężenie zginające mierzone przy strzałce ugięcia s_1 , MPa,

σ_{f2} – naprężenie zginające mierzone przy strzałce ugięcia s_2 , MPa,

Maszyny wytrzymałościowe dzięki swojej uniwersalności służą do pomiarów wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie i zginanie. Budowa oraz szczegółowy opis maszyn wytrzymałościowych został przedstawiony w rozdziale 3, pt. "Wytrzymałość na rozciąganie". Na rysunkach poniżej przedstawiono kilka nowoczesnych maszyn wytrzymałościowych z oprzyrządowaniem do badań wytrzymałości na zginanie.



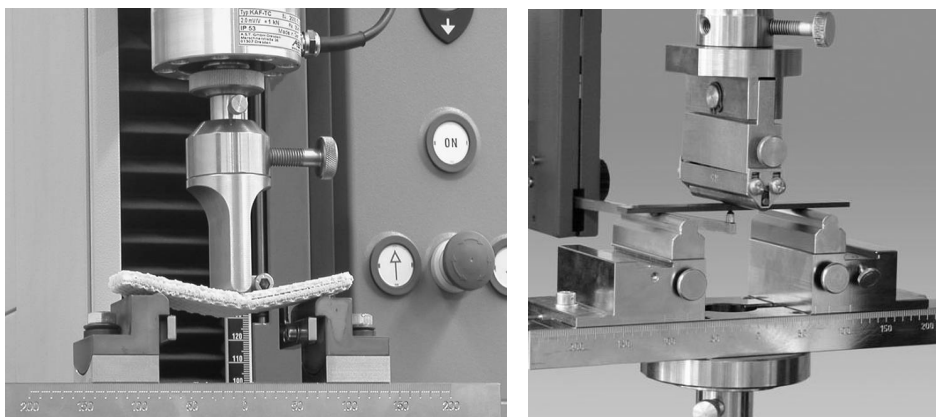
Rys. 4.3. Maszyny wytrzymałościowe podłogowe, dwukolumnowe firm: a) Instron, b) Zwick z komorą termiczną [www.instron.com, www.zwick.com]

W stosowanych maszynach najczęściej realizowane jest trzypunktowe badanie wytrzymałości na zginanie, opisane w normach ISO 178:2003 i ASTM D 790. Typowe wyniki badań oprócz wytrzymałości na zginanie σ_g , to moduł zginający E , naprężenie przy 3,5% odkształceniu oraz naprężenia i wydłużenia przy

granicy plastyczności i przy zerwaniu próbki. Wyniki badania na zginanie ukazują w szczególności zachowanie materiału w pobliżu powierzchni próbki. W porównaniu do badania na zrywanie mierzone przegięcia są około cztery razy większe niż zmiany długości w badaniu zrywającym.

Maszyny wytrzymałościowe mogą kompensować odkształcenia ramy urządzenia, czujnika siły i narzędzia zginającego przy pomocy specjalistycznego oprogramowania. Umożliwia to wystarczająco dokładny pomiar przy pomocy czujnika drogi trawersy maszyny wytrzymałościowej. Obsługa maszyny wytrzymałościowej jest dzięki temu uproszczona, szczególnie przy zastosowaniu w badaniach kontroli jakości. System sterowania napędem maszyny, gwarantuje kontrolę w funkcji siły lub wydłużenia podczas testów. Elektronika steru-jacopomiarowa synchronicznie próbuje wszystkie kanały pomiarowe i umożliwia przesyłanie grup pomiarowych do oprogramowania w czasie rzeczywistym z częstotliwością 500 Hz. Dwukolumnowe ramy obciążeniowe posiadają precyzyjne i bezluzowe prowadzenie trawersu na stalowych kolumnach, zaś cyfrowa elektronika mocowana z boku do ramy zapobiega przypadkowemu zabrudzeniu, zalaniu lub zwarcia. Maszyny są zaopatrzone również w opatentowane głowice pomiarowe siły, które są zaprojektowane i produkowane by zaoferować rozszerzony zakres pomiarowy siły i niezmiernie wysoką odporność na nieosiowe obciążenia.

Próbka poddawana badaniu powinna być wolna od wszelkiego rodzaju uszkodzeń mechanicznych takich jak pęknięcia, rysy itp. Ważne jest także zastosowanie odpowiednich układów mocujących tak, aby próbka nie ulegała odkształceniu w miejscu podparcia tylko w części środkowej. Przykłady takich układów firmy Zwick pokazane są na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Przykłady układu mocującego do badania wytrzymałości na zginanie [www.zwick.pl]

4.2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie metod badań wytrzymałości na zginanie tworzyw polimerowych. Celem ćwiczenia jest również wyznaczenie właściwości wytrzymałościowych przy zginaniu wybranych tworzyw polimerowych.

4.3. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze, przeprowadzenia ćwiczenia, obejmuje maszynę wytrzymałościową Zwick Z010 z niezbędnym oprzyrządowaniem oraz stanowiskiem komputerowym wyposażonym w oprogramowanie testExpert II.

Próbki pomiarowe należy wykonać zgodnie z wymaganiami podanymi w normie przedmiotowej dotyczącej badanego tworzywa.

Wymiary stosowanych do pomiarów prostopadłościennych próbek są następujące:

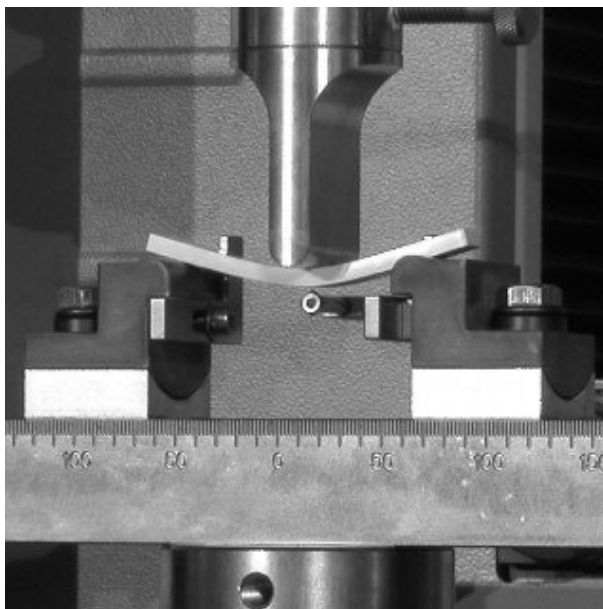
- długość $l = 80 \pm 0,2$ mm,
- szerokość $b = 10 \pm 0,2$ mm,
- wysokość $h = 4 \pm 0,2$ mm.

Przed przystąpieniem do pomiaru przygotowane próbki pomiarowe powinny być klimatyzowane przez co najmniej 16 h w temperaturze 23 ± 2 °C oraz wilgotność względna powietrza powinna wynosić $50 \pm 5\%$. W takich samych warunkach powinno się wykonywać pomiary. Szerokość próbki powinna być zmierzona z dokładnością do 0,1 mm, natomiast wysokość z dokładnością do 0,02 mm w środkowej jej części.

Próbki można również przygotować innymi metodami przetwórstwa tworzyw na przykład prasowaniem lub jedną z metod obróbki skrawaniem. Próbki pomiarowe należy przygotować tak, aby nie wykazywały anomalii powierzchniowych i materiałowych. Do pomiaru przygotowuje się pięć próbek tworzywa, które klimatyzuje się co najmniej 16 godzin w temperaturze 23 ± 2 °C i wilgotności względnej powietrza $50 \pm 5\%$.

Maszyna wytrzymałościowej firmy Zwick Z010 została opisana szczegółowo w rozdziale 3 "Wytrzymałość na rozciąganie". Różnicą w budowie jest zastosowanie układu do badania wytrzymałości na zginanie, pokazanego na rys. 4.5.

Do elektronicznego sterowania działaniem maszyny jest wykorzystywany zespół sterowniczy oraz stanowisko komputerowe. Działaniem układu zginającego steruje komputer, zaś oprogramowanie i oprzyrządowanie maszyny umożliwia przeprowadzenie próby zginania. Odpowiednie oprogramowanie umożliwia również bezpośrednią wizualizację zależności naprężenie od odkształcenia i wszystkich cech wytrzymałościowych na ekranie monitora.



Rys. 4.5. Wygląd układu mocowania próbek maszyny Zwick Z010 podczas próby zginania

4.4. Program ćwiczenia

W programie badań przyjęto jako czynniki badane:

1) bezpośrednio

- powierzchnię przekroju poprzecznego próbki do badań wytrzymałościowych, A , mm,
- rozstaw podpór układu zginającego, l_r , mm,
- siłę zginającą F , N.

2) pośrednio

- wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego na zginanie W , mm³,
- moment zginający M_g , Nm,
- naprężenie zginające σ_f , MPa,
- współczynnik sprężystości wzdłużnej przy zginaniu, E_f , MPa.

Czynnikiem zmiennym jest:

- rodzaj badanego tworzywa (minimum dwa rodzaje tworzywa lub jeden rodzaj tworzywa z napełniaczami),
- warunki technologiczne otrzymywania wyrobów w procesie wytłaczania lub wtryskiwania.

Czynnikami stałymi są:

- elementy konstrukcyjne maszyny wytrzymałościowej,
- warunki pomiarowe (zakres siły zginającej, prędkość zginania) podczas prowadzenia badań właściwości wytrzymałościowych.

Czynnikami zakłócające, których wpływ jest pomijalnie mały, to przede wszystkim niestabilność prądu elektrycznego, zmiany temperatury otoczenia, wilgotności tworzywa wejściowego oraz wilgotności względnej powietrza.

4.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

W celu prawidłowego wykonania ćwiczenia należy przeprowadzić następujących czynności:

- 1) Przygotować próbki w postaci belek, otrzymanych w procesie wtryskiwania lub przy pomocy praski wyciąć próbki, minimum 3 próbki dla każdego rodzaju tworzywa.
- 2) Określenie właściwości wytrzymałościowych przy zginaniu, należy wykonać przy zastosowaniu maszyny wytrzymałościowej wraz z niezbędnym oprzyrządowaniem, zgodnie z odpowiednią normą: PN-EN ISO 178:2003. Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy zginaniu.

Wyznaczając cechy wytrzymałościowe przy zginaniu wykonać trzeba następujące czynności:

- 1) Zmierzyć grubość oraz szerokość odcinka pomiarowego próbek i na tej podstawie obliczyć powierzchnię początkową A przekroju poprzecznego próbek.
- 2) Zamocować pierwszą próbkę w układzie do zginania próbek maszyny wytrzymałościowej.
- 3) Nastawić żadaną prędkość zginania i uruchomić maszynę wytrzymałościową, obserwując jednocześnie rejestrację wykresu obciążenia w funkcji wydłużenia aż do momentu zerwania próbki pomiarowej.
- 4) Wyznaczyć czynniki badane bezpośrednio i pośrednio, zgodnie z programem ćwiczenia.
- 5) Powtórzyć czynności dla pozostałych próbek, minimum 3 próbek dla każdego rodzaju tworzywa.

Moment zginający M_g przy zginaniu, wytrzymałość na zginanie, σ_f należy wyznaczyć, przy wykorzystaniu oprogramowania komputerowego, na podstawie zależności 4.1, 4.2, 4.3 oraz 4.4 przedstawione w Ad.4.1 ćwiczenia. Pozostałe wielkości występujące we wzorach zgodne z obowiązującą normą, zostały opisane w programie ćwiczenia.

4.6. Wyniki, sprawozdanie

Wyniki pomiarów i badań należy zestawić w tabelach 4.1 oraz 4.2 zamieszczonych we wzorze sprawozdania. Interpretację graficzną wyników prowadzonych badań, wytrzymałości na zginanie i modułu sprężystości, dla różnych rodzajów tworzyw przedstawić w formie wykresów blokowych. Sprawozdanie powinno zawierać: cel ćwiczenia, charakterystykę badań, przebieg ćwiczenia, wyniki pomiarów i obliczeń właściwości wytrzymałościowych przy zginaniu, interpretację wyników w postaci wykresów, wnioski wynikające z przeprowadzonego ćwiczenia.

Literatura

- [1] *Dokumentacja techniczno-ruchowa maszyny wytrzymałościowej Zwick Z010*, Lublin 2013.
- [2] Sikora R., *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
- [3] Broniewski T. i inni, *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [4] PN-EN ISO 178:2003. *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy zginaniu*.
- [5] PN-82/C-89051. *Oznaczanie modułu sprężystości przy rozciąganiu, ścisaniu i zginaniu*.

Politechnika Lubelska Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych Laboratorium:			
Temat ćwiczenia: Wytrzymałość na zginanie		Nr ćwiczenia	Data wykonania
Nazwisko i imię	Ocena	Grupa	Semestr
			Rok akademicki

1. Cel ćwiczenia

2. Charakterystyka badań

3. Przebieg ćwiczenia

4. Wyniki

Tabela 1

Wyniki pomiarów i obliczeń wielkości wytrzymałościowych przy zginaniu

Lp.	Rodzaj tworzywa	Przekrój próbki A , mm ²	Wskaźnik wytrzymałości przekroju W , mm ³	Wartość średnia $\overline{W}$, mm ³	Siła zginająca F , N	Wartość średnia $\overline{F}$, N
1						
2						
3						
1						
2						
3						
1						
2						
3						

Tabela 2

Wyniki obliczeń właściwości wytrzymałościowych przy zginaniu

Lp.	Moment zginający M_g , Nm	Wartość średnia $\overline{M_g}$, Nm	Naprężenie zginające σ_f , MPa	Wartość średnia $\overline{\sigma_f}$, MPa	Współczynnik sprężystości wzdłużnej E_f , MPa	Wartość średnia $\overline{E_f}$, MPa
1						
2						
3						
1						
2						
3						
1						
2						
3						

σ_f , MPa					

rodzaj próbki

E_f , MPa					

rodzaj próbki

6. Wnioski

Data Podpis

5. Wytrzymałość na zginanie i kąt ugięcia metodą Dynstat

5.1. Wiadomości wstępne

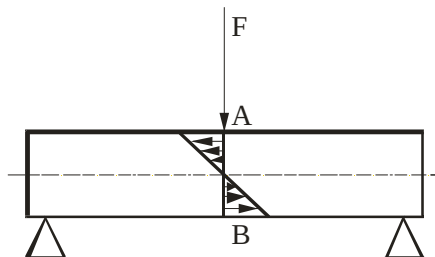
Pod pojęciem wytrzymałości mechanicznej, w tym także wytrzymałości statycznej na zginanie, rozumie się właściwość tworzywa charakteryzującą jego odporność na dekohezję pod wpływem sił zewnętrznych. Źródłem sił utrzymujących spójność tworzywa są siły wewnątrzcząsteczkowe (siły wiązań chemicznych) oraz siły międzycząsteczkowe (siły Van der Waalsa). Siły wewnątrzcząsteczkowe nie zależą od rozmiarów makrocząsteczek, natomiast wartość sił międzycząsteczkowych jest zależna od rodzaju wytwarzających je atomów.

Wytrzymałość mechaniczna tworzywa zależy również od konfiguracji oraz sposobu powiązania makrocząsteczek. Proces orientacji (uporządkowania jednokierunkowego) makrocząsteczek powoduje zwiększanie wytrzymałości w kierunku orientacji oraz zmniejszanie odkształcalności. Połączenie makrocząsteczek wiązaniami poprzecznymi zwiększa wytrzymałość oraz sprężystość tworzywa, a wywołuje zmniejszenie rozpuszczalności. Wzrost udziału fazy krystalicznej w tworzywie powoduje zwiększanie jego wytrzymałości mechanicznej oraz sprężystości, przy zmniejszaniu odkształcalności. Ważny wpływ na właściwości mechaniczne wytworów z tworzyw mają również defekty strukturalne, objętościowe oraz powierzchniowe, a także warunki przeprowadzania badań. Do defektów strukturalnych można zaliczyć naprężenia własne powstające w wyniku skurczu przetwórczego, podczas ochładzania wytworu oraz szeroko rozumiane nierówności powierzchni (np. chropowatość, falistość) próbki pomiarowej.

W tworzywach mogą występować także defekty wynikające z obecności składników dodatkowych, przede wszystkim napełniaczy, szczególnie efektywne w warstwie wierzchniej tworzywa. Związane jest to z właściwościami warstwy wierzchniej w której występują największe naprężenia własne, jak i wynikające z obciążeń zewnętrznych, podczas użytkowania wytworu. Defekty strukturalne są przyczyną koncentracji naprężeń podczas obciążania wytworu, prowadzących do dekohezji – mikropęknięć rozprzestrzeniających się na dalsze obszary tworzywa.

Jedną z podstawowych prób, za pomocą której wyznacza się właściwości mechaniczne tworzyw jest próba zginania.

Próba zginania polega na tym, że próbkę tworzywa podpartą na końcach obciąża się punktowo, prostopadle do jej osi podłużnej, jak to schematycznie przedstawiono na rys. 5.1. Odległość pomiędzy punktami podparcia musi być ściśle określona i jest zwykle unormowana. Obciążenie F przykłada się symetrycznie względem podpór; na rysunku wzdłuż osi AB.



Rys. 5.1. Rozkład naprężeń w belce zginanej wolnopodpartej

Badania wytrzymałości statycznej na zginanie tworzyw są przedmiotem licznych opracowań normalizacyjnych. Odpowiednie normy podają szczegółowo między innymi: metody pomiarów, przyrządy i materiały, kształt, wymiary, przygotowanie oraz liczbę próbek pomiarowych, sposób przeprowadzania pomiarów oraz obliczania wyników.

Badania przeprowadza się tylko do tworzyw które ulegają pękaniu w czasie pomiarów. Tworzywa silnie odkształcalne zginają się podczas pomiarów tak znacznie, że dolna powierzchnia próbki przesuwana się na podporach, a powstające przy tym tarcie powoduje wzrost naprężeń rozciągających w dolnej strefie. Takie tworzywa można zginać tylko w ograniczonym zakresie.

Podczas zginania pod wpływem siły F górna powierzchnia próbki ulega zmniejszeniu – dolna zwiększeniu, w wyniku czego w górnej części występują naprężenia ściskające, a w dolnej rozciągające.

Moment zginający M_g w miejscu przyłożenia siły F wyraża się wzorem

$$M_g = \frac{F}{4} l_r, \text{ Nm} \quad (5.1)$$

gdzie l_r – odległość podpór, m.

Aby na podstawie wyznaczonego momentu zginającego obliczyć wytrzymałość na zginanie (lub naprężenie zginające) w próbce pomiarowej, wprowadza się pojęcie wskaźnika wytrzymałości W przekroju poprzecznego na zginanie. Wskaźnik wytrzymałości jest związany z promieniem bezwładności przekroju próbki pomiarowej i jego wartość zależy od kształtu próbek pomiarowych.

Wskaźnik wytrzymałości przekroju W w przypadku próbki o przekroju prostokątnym określa równanie w postaci:

$$W = \frac{b h^2}{6}, \text{ mm}^3 \quad (5.2)$$

w którym b jest szerokością próbki w mm, natomiast h jej wysokością, mm.

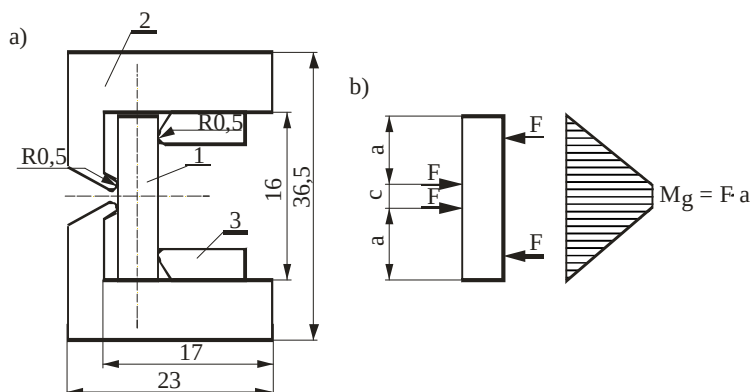
Napężenie zginające w próbce σ_b , wywołane siłą F , oblicza się po uwzględnieniu poprzednich zależności ze wzoru:

$$\sigma_f = \frac{M_g}{W} = \frac{3 F l_r}{2 b h^2}, \text{ N/mm}^2 \quad (5.3)$$

Do opisu właściwości mechanicznych tworzyw o budowie usieciowanej, charakteryzujących się małymi odkształceniami w czasie ściskania, dogodniej jest stosować zginanie ze względu na występujące tu większe i łatwiejsze do zmierzenia strzałki ugięcia. Przyrost naprężeń jest wolniejszy niż podczas rozciągania lub ściskania, dzięki czemu łatwiej wyodrębnić się zakres odkształceń sprężystych poniżej granicy proporcjonalności. Zakres pomiarów wytrzymałości statycznej na zginanie jest jednak ograniczony w zasadzie do badań półwytworów. Uzyskanie próbek pomiarowych, to jest belek o wymiarach np. 80x10x4 mm z wytworów, otrzymanych w procesie wytłaczania lub wtryskiwania, jest na ogół niemożliwe ze względu na wymiary geometryczne wytworów.

Do badań wytrzymałości na zginanie tworzyw, z których nie można ze względu na wymiary wytworu wykonać próbek w postaci belek zaleca się przeprowadzenie pomiarów za pomocą urządzenia Dynstat.

W tych badaniach przeprowadza się pomiary momentu zginającego oraz kąta ugięcia w chwili zniszczenia próbki pomiarowej tworzywa, przy stosowaniu próbek w postaci płytek o wymiarach zgodnych z odpowiednią normą [6], możliwych do pozyskania z gotowych wytworów. W zależności od rodzaju badanego tworzywa można przeprowadzić pomiary wytrzymałości na zginanie i kąta ugięcia w momencie złamania próbki lub naprężenia zginającego w przypadku tworzyw niełamliwych.



Rys. 5.2. Zasada montażu próbki oraz działania siły podczas zginania metodą Dynstat: a) zamocowanie próbki pomiarowej w uchwycie układu mocowania oraz obciążenia, b) rozkład momentu zginającego przy pomiarach wytrzymałości statycznej na zginanie: 1 – próbka pomiarowa, 2 – uchwyt zginający, 3 – wspornik ruchomy, F – siła zginająca, M_g – moment zginający, a – odległość między punktami przyłożenia siły

Próbki pomiarowe mają kształt płytek prostopadłościennych o wymiarach: długość $l = 15 \pm 1$ mm, szerokość $b = 10 \pm 0,5$ mm, grubość $h = 1,5\text{--}4,5$ mm. Próbki pomiarowe przygotowuje się z gotowych wytworów przez wycinanie, a następnie przez poddanie obróbce mechanicznej w kierunku podłużnej osi próbki. Powierzchnia próbek musi być gładka, bez rąbków wtryskowych, bez zadrapań, oraz innych uszkodzeń mechanicznych. W celu uzyskania powtarzalnych wyników próbki powinny być tej samej grubości, z tolerancją do $\pm 0,1$ mm [6].

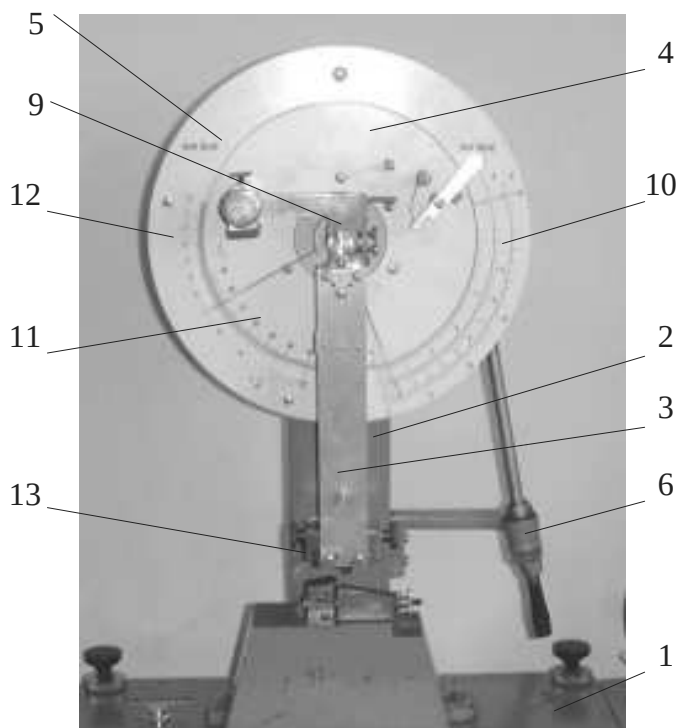
5.2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie badania wytrzymałości na zginanie i kąta ugięcia metodą Dynstat. Celem ćwiczenia jest również wyznaczenie wybranych właściwości wytrzymałościowych przy zginaniu, wytworów z minimum dwóch różnych tworzyw polimerowych.

5.3. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze, przeprowadzenia ćwiczenia, obejmuje urządzenie Dynstat z niezbędnym oprzyrządowaniem oraz suwmiarkę.

Głównymi elementami składowymi urządzenia Dynstat, przedstawionego na rysunku 5.3, są podstawa (1) i statyw (2) oraz umieszczona na nim właściwa część pomiarowa. Część pomiarowa urządzenia składa się z wahadła (3) oraz dwóch tarcz współśrodkowych, z których zewnętrzna (4) jest stała, a wewnętrzna (5) jest obracana na osi poziomej za pomocą mechanizmu ślimakowego i korby (6). Również współosiowo, z wahadłem i tarczami, są zamocowane dwa wskaźniki odczytu przeprowadzanych pomiarów. Wskaźnik (7) służy do zarejestrowania momentu zginającego oraz kąta ugięcia, zaś wskaźnik (8) do pomiaru pracy podczas badań uderzeniowych. Skala momentu zginającego (10) jest zamocowana na tarczy stałej, natomiast skala kąta ugięcia (11) znajduje się na tarczy obrotowej. Do unieruchamiania wahadła służy zapadka (13) zamocowana na statywie.

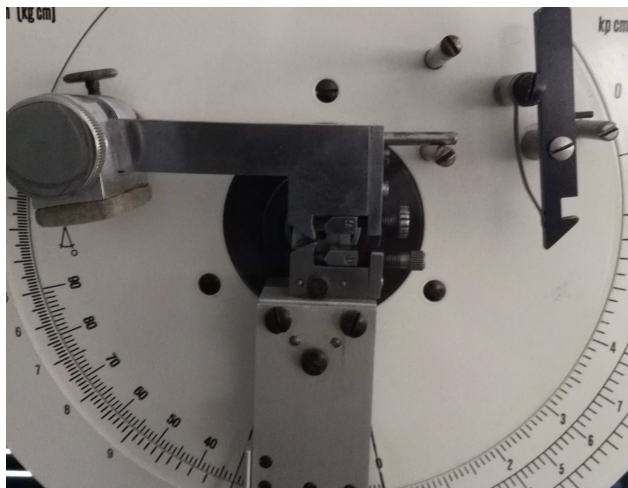


Rys. 5.3. Wygląd urządzenia Dynstat do pomiarów wytrzymałości statycznej na zginanie: 1 – podstawa, 2 – statyw, 3 – wahadło, 4 – tarcza stała, 5 – tarcza ruchoma, 6 – korba mechanizmu ślimakowego, 7 – wskaźnik momentu zginającego, 8 – wskaźnik przy pomiarach udarności, 9 – układ mocowania próbki, 10 – skala momentu zginającego, 11 – skala kąta ugięcia, 12 – skala do pomiarów udarności, 13 – zapadka

Celem rozszerzenia zakresu pomiarowego urządzenia Dynstat w dolnej części wahadła mocuje się dodatkowe obciążniki pomiarowe. U góry wahadła (rys. 5.4) znajduje się uchwyt, który wraz z częścią znajdującą się na przykręcanej podporze tworzy układ mocowania próbki (9), przy pomiarach momentu zginającego oraz kąta ugięcia.

Zasada określania wytrzymałości statycznej na zginanie, na urządzeniu Dynstat, polega na statycznym zginaniu próbki tworzywa w wyniku działania siły zginającej na cztery punkty próbki, przy stałym momencie zginającym w jej środkowej części. Wskutek obrotu tarczy ruchomej (5), za pomocą mechanizmu ślimakowego, następuje przeniesienie ruchu obrotowego, poprzez zamocowaną w uchwytach próbkę, na wahadło (3). Moment zginający działający na próbkę pomiarową, przy stałym obciążeniu, powoduje, zgodnie z zależnością (4.3), wzrost naprężenia zginającego w próbce, prowadząc w efekcie do jej zniszczenia. Wartość momentu zginającego oraz kąta ugięcia, odczytana w momencie zniszczenia próbki, pozwala na określenie wytrzymałości na zginanie. Zmierzo-

ny kąt ugięcia jest miarą odkształcenia próbki pomiarowej. W chwili pęknięcia próbki wahadło opada, natomiast wskaźniki i tarcze nie zmieniają swego położenia co pozwala łatwo przeprowadzić odczyty wyników pomiarów.



Rys. 5.4. Układ mocowania próbki pomiarowej w urządzeniu Dynstat

W badaniach tych przeprowadza się pomiary momentu zginającego oraz kąta ugięcia w chwili zniszczenia próbki pomiarowej tworzywa, przy zastosowaniu próbek w postaci płytek o wymiarach zgodnych z odpowiednią normą, możliwych do pozyskania z gotowych wytworów. W zależności od rodzaju tworzywa badanego, można przeprowadzić pomiary wytrzymałości na zginanie i kąta ugięcia w momencie złamania próbki lub naprężenia zginającego w przypadku tworzyw niełamliwych.

5.4. Program ćwiczenia

W programie badań przyjęto jako czynniki badane:

1) bezpośrednio:

- szerokość próbki do badań b , mm,
- grubość próbki h , mm,
- moment zginający M_g , Nm,
- kąt ugięcia α , deg.

2) pośrednio:

- wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego na zginanie W , mm³,
- wytrzymałość na zginanie σ , N/mm²,
- naprężenie zginające σ_f , N/mm².

Czynnikiem zmiennym jest rodzaj badanego tworzywa (minimum dwa rodzaje tworzywa lub jeden rodzaj tworzywa z napełniaczami).

Czynnikami stałymi są elementy konstrukcyjne, oprzyrządowanie, obciążniki pomiarowe urządzenia Dynstat.

Czynnikami zakłócające, których wpływ należy pominąć, to przede wszystkim niestabilność prądu elektrycznego, zmiany temperatury otoczenia, wilgotności tworzywa wejściowego oraz wilgotności względnej powietrza.

5.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

W celu prawidłowego wykonania ćwiczenia należy przeprowadzić następujących czynności:

- 1) Zmierzyć długość, szerokość oraz wysokość każdej próbki pomiarowej z wymaganą dokładnością.
- 2) Obliczyć dla poszczególnych próbek wskaźnik W wytrzymałości przekroju poprzecznego na zginanie (mm^3), według zależności 4.2.
- 3) Wyzerować urządzenia Dynstat, poprzez ustawienie wskaźników (7) oraz (8) w pozycji początkowej, a także ustawienie działki zerowej na skali kąta ugięcia (11) z podziałką zerową skali momentu zginającego (10) w jednej linii.
- 4) Wahadło (3) unieruchomić w położeniu pionowym za pomocą zapadki (13), a następnie dobrać odpowiedni przy danym tworzywie, zakres momentu obrotowego, poprzez zamontowanie na wahadle odpowiedniej tarczy z oznaczeniem A lub C.
- 5) Założyć w układ mocowania (9) próbkę pomiarową, a następnie unieruchomić ją przez dokręcenie śrubami mocującymi, tak by była ustawiona pionowo.
- 6) Rozpocząć wychylanie wahadła, powodując powolne obciążanie próbki pomiarowej momentem zginającym.
- 7) W momencie złamania próbki przerwać ruch wahadła, odczytać wartość momentu zginającego M_g oraz wartość kąta ugięcia α_g , pokazywaną na skali (10) przez wskaźnik (7). Jeżeli próbka nie złamała się całkowicie należy określić kąt ugięcia, od którego nie następuje dalszy wzrost momentu zginającego i wskaźnik zatrzymuje się w stałym położeniu na skali (11).
- 8) Złamaną próbkę usunąć z układu mocowania, a następnie poprzez pokręcanie korbą mechanizmu ślimakowego w kierunku przeciwnym do obciążenia, wyzerować urządzenie przygotowując go do następnego pomiaru.
- 9) Wytrzymałość statyczną na zginanie σ_g obliczyć na podstawie równania 4.3.
- 10) Powtórzyć pomiary po 5 razy dla każdego rodzaju tworzywa.
- 11) Za wyniki pomiarów wytrzymałości statycznej na zginanie należy przyjąć wartości średniej arytmetycznej $\bar{\sigma}$ oraz $\bar{\alpha}$ poszczególnych pomiarów, przy uwzględnieniu oceny odchylenia standardowego $\bar{s}$ otrzymanych wyników.

12) Odchylenie standardowe wartości średniej obliczyć z zależności

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (5.4)$$

w której x oznacza wynik poszczególnego pomiaru, zaś $\bar{x}$ średnią arytmetyczną pomiarów.

5.6. Wyniki, sprawozdanie

Prawidłowo sporządzone sprawozdanie z badań wytrzymałości statycznej na zginanie i kąta ugięcia powinno zawierać: cel ćwiczenia, charakterystykę tworzyw badanych, wymiary próbek pomiarowych, warunki pomiarów oraz przebieg ćwiczenia, wyniki pomiarów i obliczeń zestawione w tabelach zamieszczonych w protokole, interpretację graficzną wyników badań w postaci wykresów blokowych. Sprawozdanie należy zakończyć wnioskami wynikającymi z przeprowadzonego ćwiczenia, uwzględniającymi charakter otrzymanych zależności oraz obserwacje własne.

Literatura

- [1] *Dokumentacja techniczno-ruchowa urządzenia Dynstat*, Lublin 2013.
- [2] Sikora R., *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
- [3] Broniewski T. i inni, *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [4] PN-C 04243:1972. *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie wytrzymałości na zginanie za pomocą aparatu – typ Dynstat*.

Politechnika Lubelska Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych Laboratorium:			
Temat ćwiczenia: Wytrzymałość na zginanie i kąt ugięcia metodą Dynstat		Nr ćwiczenia	Data wykonania
Nazwisko i imię	Ocena	Grupa	Semestr
			Rok akademicki

1. Cel ćwiczenia

2. Charakterystyka badań

3. Przebieg ćwiczenia

4. Wyniki

Tabela 1

Wyniki pomiarów i obliczeń wielkości charakteryzujących
wytrzymałość na zginanie na urządzeniu Dynstat

Lp.	Rodzaj tworzywa	Moment zginający M_g , Nm	Wskaźnik W mm ³	Naprężenie zginające σ_f , N/mm ²	$\overline{\sigma_f}$ N/mm ²	$\overline{s_{\sigma f}}$ N/mm ²
1						
2						
3						
4						
5						
1						
2						
3						
4						
5						

Tabela 2

Wyniki pomiarów i obliczeń kąta ugięcia charakteryzującego
badania wytrzymałości na zginanie

Lp.	Rodzaj tworzywa	Kąt ugięcia α , deg	$\overline{\alpha}$ deg	$\overline{s_{\alpha}}$ deg
1				
2				
3				
4				
1				
2				
3				
4				

σ_f , MPa					

rodzaj materiału

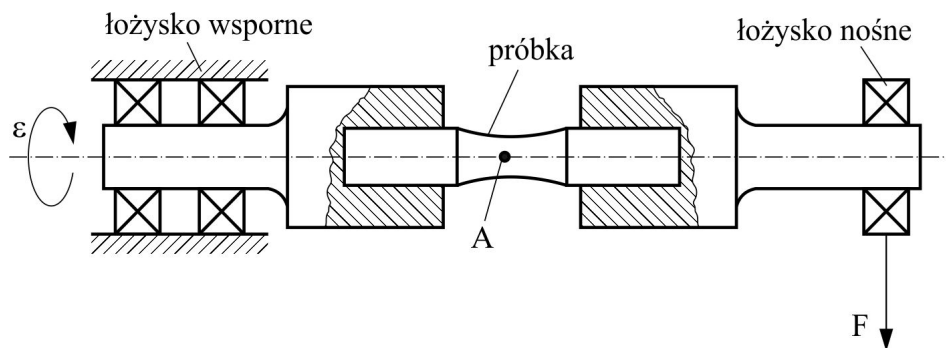
6. Wnioski

Data Podpis

6. Wytrzymałość zmęczeniowa

6.1. Wiadomości wstępne

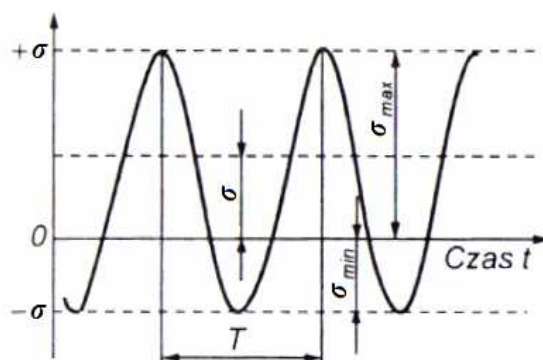
Zmęczeniem materiału nazywa się proces zmian występujących pod wpływem okresowo zmiennych naprężeń i odkształceń, które mogą doprowadzić do jego zniszczenia. Już nawet niewielkie zmiany naprężeń lub odkształceń, powtarzające się cyklicznie przez odpowiednio długi okres czasu, osłabiają wytrzymałość tworzywa polimerowego. Proces ten nazywamy zmęczeniem tworzywa, szybkość jego zachodzenia zależy głównie od rodzaju tworzywa, częstotliwości i amplitudy odkształceń, rodzaju tych odkształceń oraz temperatury. Wzrost amplitudy i częstotliwości odkształceń oraz temperatury tworzywa jednocześnie przyspiesza proces jego zmęczenia [1, 2].



Rys. 6.1. Schemat zasady badań zmęczeniowych wirująco-gnących [1]

Aby zbadać wytrzymałość zmęczeniową próbki bez karbu lub z karbem poddaje się okresowo zmiennym naprężeniom rozciągającym, ściskającym, zginającym i skręcającym. Przykładową charakterystykę zmienności w próbach zmęczeniowych przedstawiono na rysunku 6.2. Krzywa taka może mieć zupełnie inny kształt, obrazując powtarzające się zmiany może np. przedstawić tętniący cykl naprężeń, może być niesymetryczna, ale za to pojedynczy cykl pokazuje rodzaj zmęczenia.

Kwestię znaczenia badań zmęczeniowych pokazano w tabeli 6.1, gdzie porównano przykłady wytrzymałości doraźnej σ_z i zmęczeniowej Z_G po 10^7 cyklach zginania kilku tworzyw polimerowych w MPa. W czwartej kolumnie podano współczynniki odporności zmęczeniowej obrazujące jak zaskakująco mała jest wytrzymałość zmęczeniowa w stosunku do doraźnej Z_G/σ_z niektórych tworzyw.



Rys. 6.2. Przykładowa krzywa obrazująca przebieg naprężeń podczas badania zmęczeniowego: T – czas zmiany cyklu, σ – amplituda naprężenia dynamicznego [3]

Tabela 6.1

Przykłady wytrzymałości doraźnej σ_z i zmęczeniowej Z_G po 10^7 cyklach zginania wybranych tworzyw polimerowych w MPa [4]

Tworzywo	σ_z	Z_G	Z_G/σ_z
Polimetakrylan metylu	74,8	10,1	0,136
Polichlorek winylu twardy	56,2	5,7	0,101
Polistyren wysokoudarowy	47,5	0,2	0,215
Poliamid T 27	52,6	17,6	0,335
Polipropylen izotaktyczny	36,5	11,1	0,320

Wyniki te są bardzo przydatne przy porównywaniu poszczególnych tworzyw, nie mniej jednak dopiero badania przeprowadzone na gotowych wytworach mogą być pomocne przy ocenie tych tworzyw w warunkach eksploatacji. Obecnie niejednokrotnie stosuje się więc maszyny zmęczeniowe do badania całych gotowych wyrobów.

Metody badań zmęczeniowych

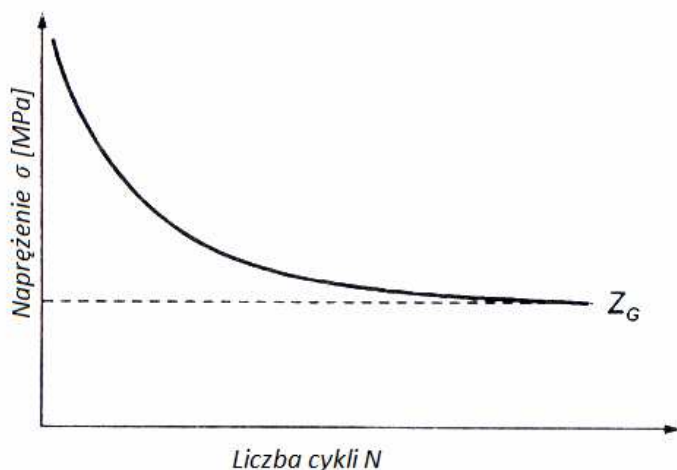
Badania zmęczeniowe tworzyw polimerowych sprowadza się najczęściej do oznaczania umownej wytrzymałości zmęczeniowej. Podczas badań zarówno w warunkach założonej stałej amplitudy naprężeń, jak i odkształceń, zmianie ulega moduł sprężystości. Powodem tego jest nagrzewanie się próbek w czasie badania. Spadek wytrzymałości zmęczeniowej w skutek nagrzewania się występuje zarówno w tworzywach zbrojonych włóknami szklanymi, węglowymi lub poliamidowymi, jak i w sztywnych tworzywach termoplastycznych. Sztywne tworzywa termoplastyczne nagrzewają się znacznie ze wzrostem częstotliwości. Dlatego tego typu badania powinny być przeprowadzane nie tylko w temperatu-

rze normalnej. Granicę zmęczenia tworzyw polimerowych wyznacza się najczęściej z wykresów zmęczenia. Rzadziej stosuje się takie metody jak: Probit, schodkowa itd.

Metoda wykresu Wöhlera

Jako miarę zmęczenia tworzywa podaje się jego wytrzymałość zmęczeniową Z_N , równą granicznemu naprężeniu, jakie może wytrzymać próbka badana po N cyklach obciążenia zmiennego o stałej amplitudzie i częstotliwości. Przebieg zmian wytrzymałości zmęczeniowej przedstawiany jest za pomocą tak zwanej krzywej Wöhlera [1, 4].

Rodzaj stosowanego naprężenia zależy od warunków w jakich tworzywo będzie pracować. Każdą próbkę poddaje się określonym zmianom i rejestruje liczbę cykli N , po której próbka ulegnie zniszczeniu. Znając naprężenia niszczące po różnych liczbach cykli N , nanosi się je na układ współrzędnych, tworząc wykres $\sigma = f(N)$ lub dogodniej $\sigma = f(\lg N)$. Otrzymuje się w ten sposób krzywą Wöhlera, będącą podstawą do oznaczenia wytrzymałości zmęczeniowej Z .



Rys. 6.3. Krzywa Wöhlera przedstawiająca zmiany wytrzymałości zmęczeniowej (σ) w zależności od liczby (N) cykli obciążenia [1]

Krzywa Wöhlera obrazuje zmiany wartości naprężenia, przy którym zachodzi zniszczenie tworzywa, po określonej liczbie cykli obciążenia, przy czym amplituda i częstotliwość obciążenia są w czasie badań stałe. Zmiana każdej z tych wielkości dla danego tworzywa, powoduje zmianę krzywej Wöhlera.

Podczas obciążenia tworzyw w sposób zmienny zarówno w przypadku stałej amplitudy naprężeń, jak i odkształceń, zmianie ulega współczynnik sprężystości wzdłużnej. Powoduje to, że w odróżnieniu od metali, wraz ze wzrastającą liczbą cykli obciążenia, krzywa Wöhlera nie zmienia asymptotycznie Z , ale jest wciąż

krzywą malejącą. Ustaloną wartość Z_N przyjmuje się dla $N=10^6-10^8$ cykli. W trakcie obciążenia zmiennego w tworzywie generowane jest ciepło, którego źródłem jest praca związana z jego odkształceniem. Jest to przyczyną wzrostu temperatury tworzywa, z którą związane są również zmiany strukturalne. Polegają one z jednej strony na zwiększeniu krystaliczności tworzywa, a z drugiej na rozdrobnieniu istniejących struktur krystalicznych.

Zmiany wytrzymałości tworzywa w warunkach zmiennego obciążenia, w stosunku do wytrzymałości doraźnej, obrazuje współczynnik zmęczenia (k), definiowany w następujący sposób:

$$k = \frac{Z}{R} \quad (6.1)$$

gdzie: Z – wytrzymałość zmęczeniowa dla danego typu obciążenia, R – wytrzymałość doraźna.

Wartości współczynnika k wybranych, powszechnie stosowanych tworzyw, poddanych próbom wytrzymałości doraźnej na zginanie oraz próbom wytrzymałości zmęczeniowej na zginanie z częstotliwością 100 Hz i o liczbie cykli $N=10^7$, przedstawiono w tabeli 6.2.

Tabela 6.2

Wartości współczynnika k niektórych tworzyw

Tworzywo	PE-LD	PE-HD	PVC twardy	PS	PMMA
Wartość k	0,14	0,10	0,07	0,07	0,17

Po 10^7 cykli zginania występującego z częstotliwością 100 Hz, czyli po około 28 godzinach trwania tego obciążenia, wytrzymałość zmęczeniowa na zginanie maleje do kilku lub kilkunastu procent wytrzymałości doraźnej na zginanie. Świadczy to o tym, że dobór rodzaju tworzywa oraz wymiarów elementów tworzywowych, eksploatowanych w warunkach zmiennych obciążeń, musi być wykonywany ze szczególną starannością i uwzględnieniem możliwe wszystkich czynników wpływających na wytrzymałość zmęczeniową [3, 6].

Metoda schodkowa

Metoda schodkowa została opracowana przez Dixona i Mooda. Stosowanie jej w badaniach zmęczeniowych tworzyw polimerowych jest celowe, gdyż jest dokładna i nadaje się do materiałów o dużej dyspersji wyników pomiarów. Granicą zmęczenia Z , według metody schodkowej, jest takie naprężenie, w cyklu określonym przez amplitudę cyklu naprężeń, średnie naprężenie cyklu i współczynnik amplitudy cyklu, które spowoduje zniszczenie około 50% badanych próbek przed osiągnięciem przez nie założonej bazy N_G . Z definicji Z i spo-

sobu prowadzenia eksperymentu wynika, że przed rozpoczęciem badań należy założyć: liczebność próby n_0 , bazę N_G oraz wartość stopnia naprężenia $\Delta\sigma$.

Liczba próbek zalecanych do konstrukcji wykresu schodkowego wynosi 40–50. Wielkość bazy N_G w badaniach porównawczych tworzyw polimerowych najczęściej wynosi 10^7 . Dobierając bazę należy wziąć pod uwagę, aby liczba nie była zbyt mała (ze względu na techniczną wartość wytrzymałości zmęczeniowej), oraz zbyt duża, wówczas następowałoby wydłużenie czasu trwania próby, doprowadzające do starzenia materiału, co znacząco wpływa na wyniki pomiaru.

Trzecim parametrem przyjmowanym w metodzie schodkowej jest stopień naprężenia $\Delta\sigma$. Pierwsze badane próbki obciąża się większymi stopniami naprężenia, aż do osiągnięcia dwójki próbek, które dałyby przeciwne wyniki względem założonej bazy N_G , a następnie mniejszymi i już stałymi do zakończenia próby. Podstawą analizy statystycznej jest zdarzenie rzadziej występujące w eksperymencie.

W tej metodzie średnią wartość umownej wytrzymałości zmęczeniowej obliczamy ze wzoru:

$$Z = \sigma + \Delta\sigma \left(\frac{\sum i x n_i}{n} \pm 0,5 \right) \quad (6.2)$$

gdzie: σ – najmniejsza wartość naprężenia rzadziej występującego zdarzenia, $\Delta\sigma$ – stopień naprężenia, i – kolejny numer poziomu naprężenia, n_i – liczba próbek na poszczególnych poziomach naprężenia zdarzenia radszego w próbie, n – liczba próbek rzadziej występującego zdarzenia (tak przyjmuje się zawsze), $\pm 0,5$ – znak plus stosuje się wówczas gdy obliczamy Z według zdarzeń, które nie nastąpiły, to jest próbka nie została złamana, natomiast znak minus, stosuje się dla próbek zniszczonych, to jest zdarzeń, które nastąpiły [1, 4].

Metoda przeciążeń schodkowych

W przypadku elementów o złożonym kształcie, które powinny być badane w całości, stosuje się metodę przeciążeń schodkowych jest to metoda o małej liczbie populacji i o dużej dokładności oznaczania granicy zmęczenia.

Metoda przeciążeń schodkowych polega na połączeniu elementów metody Locati z metodą Dixona i Mooda. Z metody Locati bierze sposób prowadzenia eksperymentu, to jest stopniowe obciążanie tej samej próbki aż do pęknięcia, natomiast z metody Dixona i Mooda część analityczną, czyli obliczanie granicy zmęczenia.

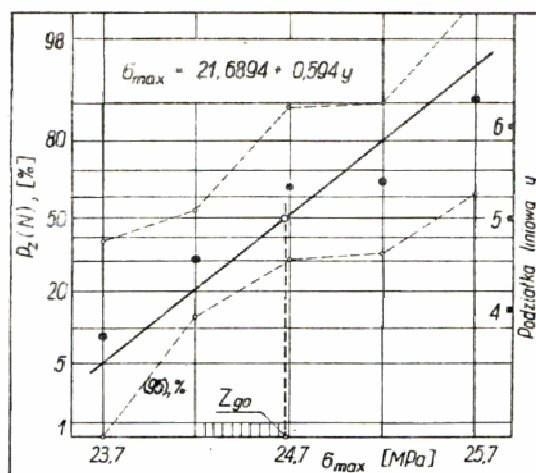
Podczas oznaczania granicy zmęczenia tą metodą:

- pierwszą próbkę obciąża się naprężeniem bliskim spodziewanej granicy zmęczenia,

- Dziesięcioliczbowa populacja próby zmęczeniowej daje w metodzie przeciężeń schodkowych prawie takie same wyniki jak 40-liczbowa w metodzie schodkowej (prawie – oznacza błąd nie większy niż 7 %). Jest więc 3, a nawet 4-krotnie tańsza, przez co może zrekompensować wysokie koszty bezpośrednich badań zmęczeniowych [3, 6].

Partię próbek o liczebności n należy podzielić na pięć serii i badać przy różnych wartościach naprężenia $\sigma_{\max}$. Wartości i stopień naprężenia należy dobierać tak, aby dla dwóch pierwszych serii oznaczeń liczba zniszczonych próbek n_z była mniejsza, a dla dwóch końcowych większa niż 50%. Dla naprężenia środkowego, aby w przybliżeniu połowa badanych próbek uległa zniszczeniu. Z otrzymanych wyników pomiarów należy sporządzić wykres w układzie prawdopodobieństwo $P_z(N)$ powstania złomu przez osiągnięciem założonej bazy N_G – naprężenie maksymalne $\sigma_{\max}$.

Poszukiwaną wartość granicy zmęczenia Z wyznacza na osi odcięty punkt powstały z przecięcia się prostej $P_z = P_z(\sigma_{\max})$ określonej analitycznie z prostą $P_z = 50\%$. Ponadto z wykresu można odczytać wartość odchylenia standardowego S dla obszaru jednosigmowego [2, 6].

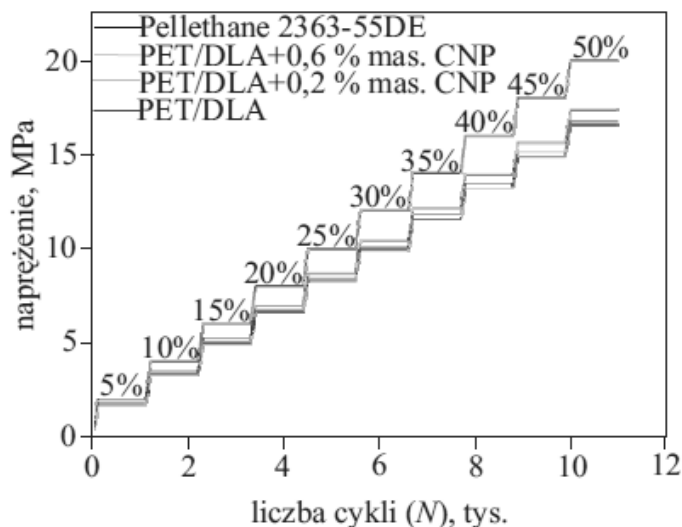


Rys. 6.4. Wyznaczanie granicy zmęczenia metodą Probit [1]

Metoda pętli histerezy mechanicznej na przykładzie tworzyw wykorzystywanych w medycynie

Tworzywa polimerowe coraz częściej wykorzystywane są w medycynie na przykład jako materiał do mechanicznych protez serca, które stosowane są w celu wspomagania leczenia serca lub zastępowania nieuleczalnie chorego i niewydolnego narządu. Tworzywo musi jednak przejść badania wytrzymałościowe mające potwierdzić jego predyspozycje konstrukcyjne. W konwencjonalnych testach zmęzeniowych, materiał jest poddawany cyklicznym obciążeniom, podczas których wyznacza się liczbę cykli koniecznych do jego zniszczenia. Jednak metoda ta nie może być wykorzystana do badania materiałów elastomerowych [2, 5].

Dla tego typu materiałów stosuje się metodę pętli histerezy mechanicznej, pozwalającą na określenie zmiany szeregu parametrów mechanicznych, a w konsekwencji zmian strukturalnych zachodzących w materiale elastomerowym. Jednocześnie, w tym samym czasie, mierzy się różne wielkości, m.in.: naprężenie, amplitudę odkształcenia, wartość absorbowanej i rozproszonej energii, tłumienie (które, jest istotnym wskaźnikiem określającym stopień zniszczenia materiału) oraz pełzanie w warunkach dynamicznych. Metoda jest przydatna zwłaszcza w badaniach elastycznych materiałów, takich jak elastomery termoplastyczne i kauczuki. Stosując szybką technikę wyznaczania wartości naprężeń (tzw. metodą skokowo narastających obciążeń), można ocenić proces „dynamicznego pełzania” w warunkach sinusoidalnie zmiennych obciążeń (obciążeń dynamicznych) (rys. 6.5).



Rys. 6.5. Zmiana naprężenia średniego w funkcji wzrastającego poziomu obciążania dla wybranych tworzyw [1]

Lepkosprężysty charakter materiałów polimerowych sprawia, iż podczas deformacji naprężenia i odkształcenia nie występują w fazie. Możemy zaobserwować opóźnione odkształcenie w stosunku do działającego naprężenia, a w konsekwencji pojawienie się pętli histerezy. Powierzchnia uzyskanej pętli histerezy obrazuje energię deformacji dyssypowaną w jednym pełnym cyklu odkształcenia. Jest ona różnicą pomiędzy energią zamienioną przy obciążeniu głównie na ciepło, a energią otrzymaną z powrotem przy odciążeniu. Pętla histerezy wyznaczona doświadczalnie jest prostą metodą zbadania natury energii dyssypacji w polimerach, która spowodowana jest wewnętrznym tarcieniem pomiędzy łańcuchami [2].

6.2. Cel ćwiczenia

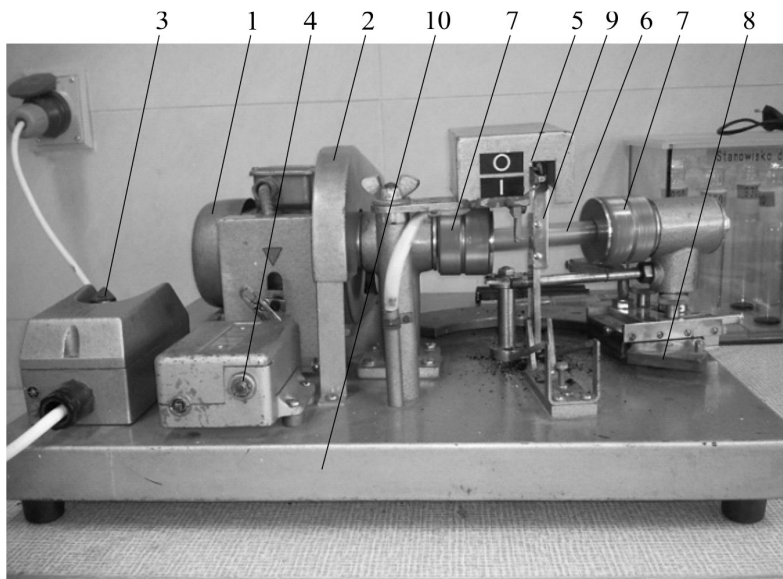
Celem ćwiczenia jest poznanie zjawiska wytrzymałości zmęczeniowej, oraz określenie wytrzymałości zmęczeniowej rur oraz określenie liczby cykli potrzebnych do zniszczenia próbki.

6.3. Stanowisko badawcze

W skład stanowiska do badań wytrzymałości zmęczeniowej wchodzi następujące elementy:

- maszyna wytrzymałościowa (rys. 6.6) do badań zmęczeniowych niemieckiej firmy Veb Thüringer Industrierwerk Rauenstein, typ DPGi,
- tachometr (rys. 6.7), służący do pomiarów prędkości obrotów wału napędowego w silniku lub w maszynie.
- pirometr (rys. 6.8), służącego do bezdotykowego pomiaru temperatury, działający w oparciu o analizę promieniowania cieplnego emitowanego przez badane ciało.

Układ napędowy maszyny wytrzymałościowej działa na zasadzie napędu przez silnik elektryczny (1), następnie zaś obroty silnika przekazywane są za pomocą przekładni pasowej (2) na wał, na którym zamocowane są szczęki mocujące (7). W szczękach mocowana jest próbka (6), o którą opierany jest nożyk (9). Konstrukcja urządzenia pozwala na ustawienie kąta skręcenia (8) pod jakim będziemy badać próbkę. Po włączeniu maszyny za pomocą włącznika (3), licznik (4) zaczyna zliczać cykle z określonym przełożeniem. W momencie kiedy próbka zostaje zerwana urządzenie wyłącza się, za pomocą mechanizmu wyłączającego (5). Cały układ zamocowany jest na prostokątnej podstawie (10).



Rys. 6.6. Maszyna zmęczeniowa firmy VTIR, 1 – silnik elektryczny, 2 – przekładnia pasowa, 3 – włącznik, 4 – licznik, 5 – mechanizm wyłączający przy zerwaniu próbki, 6 – próbka, 7 – szczęki mocujące próbkę, 8 – układ regulacji kąta skręcenia, 9 – nożyk, 10 – podstawa



Rys. 6.7. Urządzenia pomocnicze wykorzystywane podczas pomiarów: a) tachometr STANDARD, ST-6236B, do pomiaru prędkości obrotowej, b) pirometr, typ WTG-510, do bezdotykowego pomiaru temperatury

6.4. Program ćwiczenia

W programie badań przyjęto następujące czynniki badane:

- 1) bezpośrednio
 - liczba obrotów licznika w ,
 - szybkość obrotowa próbki v , obr/min,
 - temperatura próbki T , °C.
- 2) pośrednio
 - liczba cykli L ,
 - czas pomiaru t , h.

6.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

Przygotowanie próbek

Przed przystąpieniem do pomiaru istotne jest właściwe przygotowanie próbek badawczych. W celu odpowiedniego zamocowania próbek w szczękach maszyny zmęczeniowej próbki badawcze powinny być proste, bez zakrzywień i załamań oraz posiadać wymiary zgodne z tabelą 6.3.

Tabela 6.3

Wymiary próbek do badań próbek

Próbka	Dz, mm	Dw, mm	L, mm
I	20,25	12,19	120
II	20,15	12,51	

Wykonanie pomiarów

Badane próbki należy odciąć z węzy wykonanych z różnych materiałów oraz zmierzyć ich wymiary. W szczękach maszyny należy zamocować próbkę przy kącie skreślenia równym 15°. Do próbki należy dosunąć mechanizm wyłączający urządzenie w momencie kiedy ulegnie ona zniszczeniu, przy czym należy zachować odległość urządzenia od próbki uniemożliwiającą kontakt. Następnie o próbkę trzeba oprzeć nożyk mający na celu przyspieszenie jej zniszczenia. Po wykonaniu tych czynności można uruchomić maszynę. W czasie badania próbka zostaje poddana zginaniu będącym skutkiem ruchu obrotowego o prędkości 940 obr/min. Od momentu uruchomienia urządzenia licznik zlicza wykonane obroty. Urządzenie zlicza obroty w skali 1:94. Po przerwaniu przez nożyk powłoki zewnętrznej następuje wyłączenie urządzenia, po czym należy odczytać z licznika ilość obrotów określającą (w odpowiednich proporcjach) liczbę cykli. Przed zamontowaniem kolejnej próbki należy odczytać wartości z licznika, po czym go wyzerować. Następnie należy ustawić kąt 30° i zamontować próbkę. Kolejne czynności są analogiczne jak w przypadku badania próbki pierwszej.

Po odpowiednim przekształceniu wartości odczytanych z licznika otrzymamy liczbę cykli potrzebną do zniszczenia próbki.

Liczbę cykli obliczamy za pomocą wzoru:

$$L = \frac{w \cdot n}{10} \quad (6.3)$$

gdzie: L – liczba cykli, w – wskaźnik licznika, n – 940 obr/min, prędkość stała układu mocującego, 10 – jest to stała określająca przełożenie licznika w odniesieniu do prędkości obrotowej układu mocującego.

Czas pomiaru wyznaczamy na dwa sposoby:

- za pomocą stopera (trzeba jednak brać pod uwagę, że pomiar będzie trwał kilkanaście godzin, jednak będzie dokładniejszy),
- z zależności

$$t = \frac{w}{10 \cdot 60}, \text{ h} \quad (6.4)$$

gdzie: t – czas pomiaru, w – wskazania licznika.

W czasie jednej minuty licznik zmienia wartość odczytu o 10 działek.

6.6. Wyniki, sprawozdanie

Wyniki pomiarów i badań należy zestawić w tabeli. Interpretację graficzną wyników prowadzonych badań dla różnych rodzajów próbek przedstawić w formie wykresów blokowych. Prawdłowo sporządzone sprawozdanie powinno zawierać: cel ćwiczenia, przebieg ćwiczenia, wyniki pomiarów i obliczeń zestawione w tabelach, wnioski wynikające z przeprowadzonego ćwiczenia.

Literatura

- [1] Broniewski T., Kapko J., Płaczek W., Thomalla J., *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*, WNT, Warszawa 2000.
- [2] El Fray M., *Badania zmęzeniowe nanokompozytów elastomerowych przeznaczonych na systemy wspomagania serca*, Polimery 2011, 56, 571-577.
- [3] Nowak M., *Wytrzymałość tworzyw sztucznych*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1987.
- [4] Porębska R., Mazurkiewicz S., *Energia dyssypacji w kompozytach polimerowych*, Czasopismo Techniczne Mechanika 2009, 106, 245-248.
- [5] Sikora R., *Tworzywa wielkocząsteczkowe – rodzaje, właściwości i struktura*. Wyd. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1991.
- [6] Żenkiewicz M., *Tworzywa wielkocząsteczkowe: polimeryzacja – właściwości – badania*, Wyd. Akademii Bydgoskiej, Bydgoszcz 2002.

Politechnika Lubelska Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych Laboratorium:			
Temat ćwiczenia: Wytrzymałość zmęczeniowa		Nr ćwiczenia	Data wykonania
Nazwisko i imię	Ocena	Grupa	Semestr
			Rok akademicki

1. Cel ćwiczenia

2. Charakterystyka badań

3. Przebieg ćwiczenia

4. Wyniki

Tabela 1

Wyniki pomiarów czynników badanych bezpośrednio

Lp.	Tworzywo badane	Liczba wskazań licznika	Szybkość obrotowa próbki v , obr/min	Temperatura próbki T , °C
1				
2				
3				
4				
5				

Tabela 2

Wyniki pomiarów i obliczeń czynników badanych pośrednio

Lp.	Tworzywo badane	Kąt odchylenia, °	Liczba wskazań licznika	Czas pomiaru t , h	Liczba cykli L
1					
2					
3					
4					
5					

L

Kąt skręcenia, °

5. Wnioski

Data Podpis

7. Udarność

7.1. Wiadomości wstępne

Badania udarności należą do grupy dynamicznych metod badań właściwości tworzyw polimerowych. Udarność jest miarą kruchości materiałów, a jej badanie polega na określeniu pracy potrzebnej do dynamicznego zniszczenia próbki, przypadającej na jednostkę pola powierzchni jej przekroju poprzecznego. Znanych jest kilka metod badania, ale trzy z nich mają największe znaczenie w technice, są to: metoda Charpy'ego, metoda Izoda oraz badanie metodą Dynstat. W metodzie Charpy'ego oraz Izoda wykorzystuje się jako przyrządy pomiarowe młoty wahadłowe, zaś w metodzie Dynstat, urządzenie Dynstat.

Metoda Charpy'ego

Jedna z najpopularniejszych metod pomiaru udarności – metoda Charpy'ego polega na złamaniu próbki w kształcie prostopadłościennej belki, ułożonej poziomo i obustronnie podpartej na skutek jednego uderzenia wahadłowego młota w środek belki między podporami. Podczas pomiaru udarności określa się pracę zużytą na dynamiczne złamanie próbki odniesioną do jej początkowego pola przekroju poprzecznego. Wyniki uzyskane w tych metodach nie są ze sobą porównywalne i nie dają się nawzajem przeliczyć.

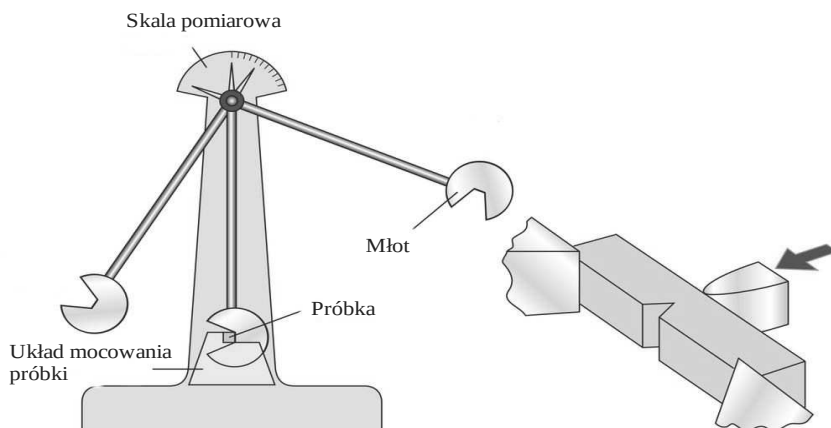
Metoda Charpy'ego ma zastosowanie do pomiaru udarności tworzyw do prasowania, wtryskiwania i wytłaczania, żywic oraz tworzyw warstwowych. Nie stosuje się jej do badania tworzyw porowatych. Jednostką udarności jest kJ/m^2 , ale spotyka się jeszcze jednostkę $\text{kG} \cdot \text{cm/cm}^2$, wyrażająca pracę potrzebną do złamania badanej belki o przekroju 1 cm^2 spadającym na nią z wysokości 1 cm młotem o masie 1 kg .

Warunki przeprowadzenia badania udarności metodą Charpy'ego określa norma PN-EN ISO 179-2:2001. Norma przewiduje wykonywanie badań sztywnych tworzyw dwiema metodami: na próbkach z karbem lub bez karbu. W przypadku wykonywania badania udarności próbek z karbem uderzenie młota powinno być skierowane w powierzchnię próbki naprzeciw karbu.

Za pomocą metody Charpy'ego określa się:

- udarność próbek bez karbu a_{CU} , która odpowiada pracy zużytej na dynamiczne złamanie próbki bez karbu odniesionej do początkowego pola przekroju poprzecznego próbki w miejscu złamania, wyrażoną w kJ/m^2 ,
- udarność próbek z karbem a_{CN} , która odpowiada pracy zużytej na dynamiczne złamanie próbki z karbem odniesionej do początkowego pola przekroju poprzecznego próbki w miejscu złamania, wyrażoną w kJ/m^2 ,

Metodę Charpy'ego wykorzystuje się do badania i oceny właściwości tworzyw polimerowych oraz kontroli produkcji i atestacji odbioru tworzyw oraz otrzymanych z nich wytworów. Może również służyć do porównawczej oceny stopnia kruchości lub plastyczności tworzywa w zakresie określonym warunkami badania. Ponadto wyniki pomiarów udarności mogą być wykorzystywane jako źródło danych do projektowania wytworów z tworzyw, jeśli badaniu poddaje się próbki różnych kształtów, o zmiennym promieniu zaokrąglenia karbu i przeprowadza się je w różnych temperaturach. Schemat zasady oznaczania udarności metodą Charpy'ego przedstawiono na rys.7.1.



Rys. 7.1. Zasada oznaczania udarności metodą Charpy'ego [www.zwick.com]

Zgodnie z normą do badań udarności tworzyw metodą Charpy'ego stosuje się próbki trzech typów bez karbu o wymiarach podanych w tablicy 7.1 oraz próbki dwóch typów z karbem o wymiarach zamieszczonych w tablicy 7.2 i przedstawionych na rys. 7.2. Próbkę w postaci prostokątnych belek wykonuje się według wytycznych odpowiednich norm dotyczących metod ich przygotowania, stosując zalecenia podane w szczegółowych normach przedmiotowych na badany rodzaj tworzywa. Przykładowo próbki z tworzyw termoplastycznych są wykonywane poprzez wtryskiwanie lub wytłaczanie, zaś z tworzyw termoutwardzalnych metodą prasowania. Próbki z żywic są otrzymywane poprzez odlewanie lub wycinanie z odlanych płyt, natomiast z wyrobów gotowych otrzymuje się je przez wycinanie i obróbkę skrawaniem. Próbki pomiarowe nie mogą wykazywać zwichrowania i muszą mieć wzajemnie prostopadłe pary równoległych do siebie powierzchni, które powinny być wolne od rys, zapadnięć, pęcherzy i podobnych defektów. Grubość próbki z karbem liczy się od głębokości wykonanego odpowiednim frezem karbu, pomiar jej wymiarów przeprowadza się z dokładnością $\pm 0,02$ mm.

Tabela 7.1

Typy próbek do oznaczania udarności Charpy'ego
zgodnie z PN-EN ISO 179-1:2004

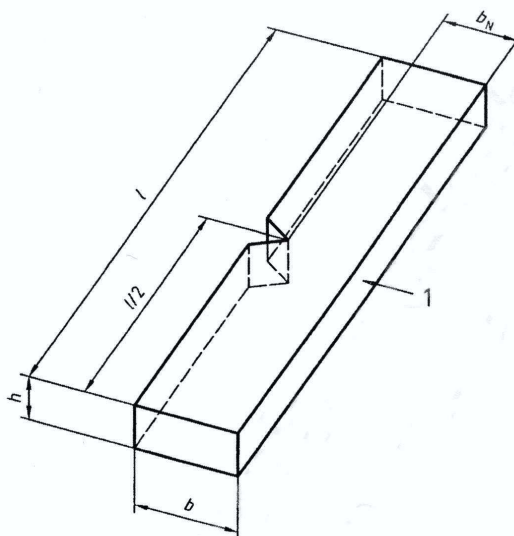
Typ próbki	Wymiary próbek, mm			Rozstaw podpór d, mm
	długość l	szerokość b	grubość h	
1	80 ± 2	$10 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$	$62^{+0,5}_{-0,0}$
2*	25h	10 lub 15	3	20h
3*	11h lub 15h			6h lub 8h

*wymiary dla próbek wzmocnionych włóknem długim

Tabela 7.2

Rodzaje karbów do oznaczania udarności Charpy'ego dla próbek z karbem

Typ próbki	Kierunek uderzenia	Rodzaj karbu	Promień podstawy karbu r_N , mm	Szerokość końcowa b_N przy podstawie karbu, mm
1	krawędziowy	bez karbu		
		karb pojedynczy		
		A	$0,25 \pm 0,05$	$8,00 \pm 0,02$
		B	$1,00 \pm 0,05$	$8,00 \pm 0,02$
		C	$0,10 \pm 0,02$	$8,00 \pm 0,02$
	płaszczyznowy	bez karbu		



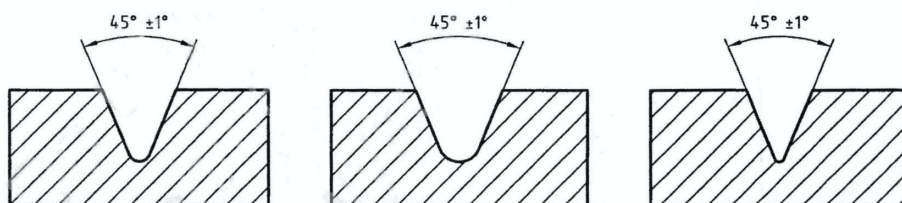
Rys. 7.2. Wygląd próbek z karbem do pomiaru udarności metodą Charpy'ego

Zasada pomiaru podczas oznaczania udarności jest następująca. Młot ustawiany jest w pozycji pionowej i sprawdzane jest czy zwolniony bez próbki wskaże energię 0, po czym ustawia się go ponownie. Przekrój próbki w miejscu uderzenia mierzy się z dokładnością do $\pm 0,1$ mm. Próbkę umieszcza się na podporach i ustawia wskazówkę zabieraka na maksymalnej wartości na skali. W celu zbadania próbki z karbem młot winien uderzyć w powierzchnię przeciwną do karbu. Ostrożnie i bez wstrząsów należy zwolnić młot stojąc od strony, w którą nie polecą odłamki i odczytać użytą energię wskazaną przez łamanie próbki.

Wygląd przykładowego młota udarowego do oznaczania udarności przedstawiono na rys. 7.3, zaś w tabeli 7.3 pokazano wartości udarności z karbem i bez karbu wybranych tworzyw termoplastycznych.



Rys. 7.3. Przykład młota wahadłowego firmy Zwick; wygląd ogólny oraz podczas próby udarności metodą Charpy'ego [www.zwick.com]



Rys. 7.4. Wygląd i kształt karbu dla próbek, oznaczania udarności metodą Charpy'ego, typu A, B, C

Udarność bez karbu a_{cU} oblicza się z zależności

$$a_{cU} = \frac{W_B}{b \cdot h} 10^3, \text{ kJ/m}^2 \quad (7.1)$$

zaś udarność z karbem a_{cN}

$$a_{cN} = \frac{W_B}{b_N \cdot h} 10^3, \text{ kJ/m}^2 \quad (7.2)$$

gdzie: W_B – energia uderzenia zużyta na złamanie próbki, kJ,
 b – szerokość próbki, mm,
 b_N – szerokość próbki przy podstawie karbu, mm,
 h – grubość próbki, mm.

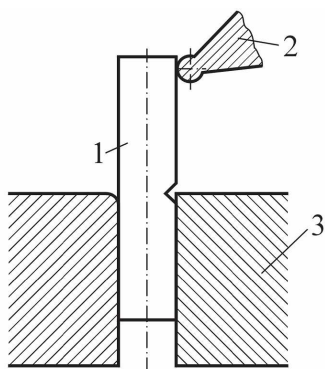
Tabela 7.3

Wartość udarności z karbem i bez karbu wybranych tworzyw

Tworzywo	Udarność bez karbu, kJ/m ²	Udarność z karbem, kJ/m ²
Polietylen PE-HD	15	5
Polipropylen	25	5
Polichlorek winylu twardy	50	4
Polistyren	18	2
Poliformaldehyd	100	10
Poliamid	140	15
Poliwęglan	nie pęka	30–90
Polimetakrylan metylu	20	4

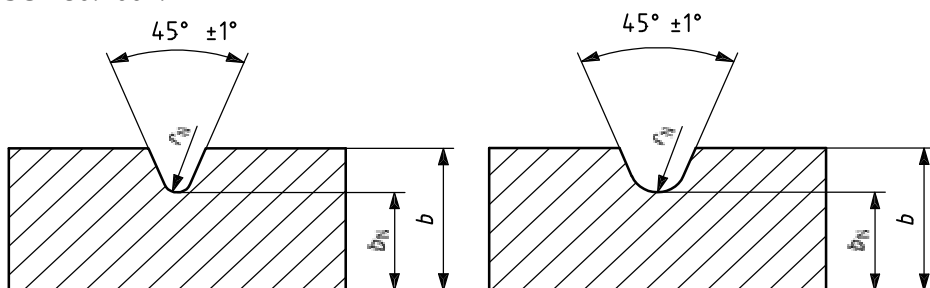
Metoda Izoda

Badania udarności metodą Izoda przeprowadza się z wykorzystaniem młota o wartości 2,75 J lub 5,5 J. Metoda Izoda różni się od metody Charpy'ego sposobem zamocowania próbki, wymiarami próbek oraz prędkością uderzenia wahadła młota. Metodą tą przeprowadza się badania udarności próbek bez karbu oraz próbek z karbem. Karb ma przekrój trójkątny o kącie rozwarcia 45° i głębokość 2,5 mm, a więc wymaga wyfrezowania odpowiednim narzędziem skrawającym (rys. 7.6). Próbkę mocuje się pionowo do wysokości karbu, jednym końcem w uchwycie podstawy.



Rys. 7.5. Zasada oznaczania udarności metodą Izoda: 1 – próbka pomiarowa, 2 – ostrze wahadła młota, 3 – podpory

Wyniki podaje się w stopo-funtach na cal do kwadratu (jednostki anglosaskie). W Polsce dopuszcza się oznaczanie udarności metodą Izoda pod warunkiem posiadania młota o prędkości 3,5 m/s w chwili uderu, a więc większej niż w młotach powszechnie spotykanych. Skalę takich młotów wyraża się fabrycznie w dżulach, dzięki czemu niepotrzebne jest przeliczanie jednostek anglosaskich, wówczas wartość udarności wyraża się w kJ/m^2 , zgodnie z PN-EN ISO 180:2004.



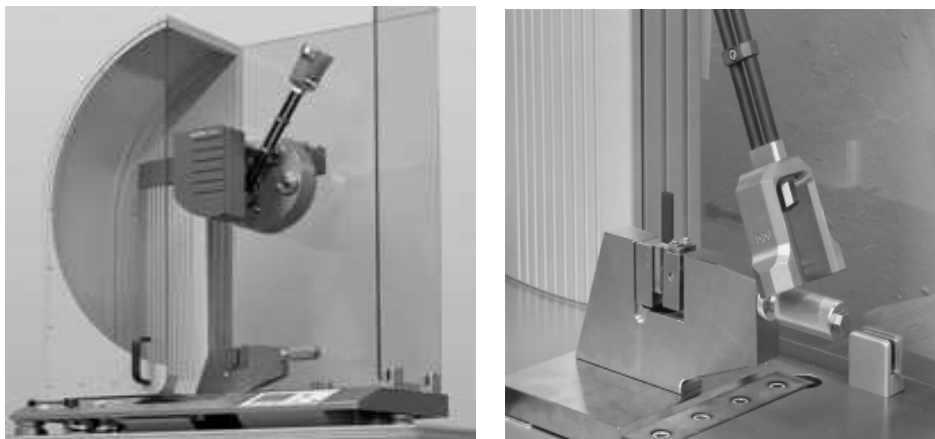
Rys. 7.6. Wygląd i kształt karbu dla próbek, oznaczania udarności metodą Izoda, typu A, B

Tabela 7.4

Wymiary próbek do oznaczania udarności metodą Izoda

Oznaczenie próby	Wymiary próbek, mm	Rodzaj karbu	Promień podstawy karbu r_N , mm	Szerokość końcowa b_N przy podstawie karbu, mm
ISO 180/U	$l = 80 \pm 2$	bez karbu	-	-
ISO 180/A	$b = 10 \pm 0,2$	A	$0,25 \pm 0,05$	$8,00 \pm 0,02$
ISO 180/B	$h = 4 \pm 0,2$	B	$1,00 \pm 0,05$	

W metodzie Izoda młot zawieszony na osi porusza się jak swobodne wahadło zaś jego skala jest zaopatrzona w zbierak spełniający rolę wskazówki. Młot spadający z ustawionej na górze pozycji wykonuje pełny obrót, przy czym wskazówka pokazuje wartość 0 gdyż młot nie wykonał żadnej pracy poza pokonaniem oporu powietrza. Aby młot wykonał pracę na odpowiednich podporach mocujemy próbkę pomiarową. Spadający młot łamie ją, co pochłania odpowiednią energię, a wskazówka pokazuje pracę zużytą na złamanie próbki. Stosunek masy wahadła do ramy jest bardzo wysoki i pozwala mierzyć 80% zużywanej energii z dużą dokładnością. Rama jest wykonana z żeliwa by tłumić drgania. Aparatura pomiarowa może być umieszczona na każdym stole który posiada odpowiednią stabilność boczną. Wahadła jest łatwo zmienić poprzez mechanizm zwalniający, nie używając przy tym narzędzi. Automatyczne rozpoznawanie wahadła za pomocą kodów eliminuje powstawanie błędów.



Rys. 7.7. Przykład młota wahadłowego firmy Zwick; wygląd ogólny oraz podczas próby uderzeniowej metodą Izoda [www.zwick.com]

Uderzenie metodą Izoda bez karbu a_{iU} wyznacza się ze wzoru:

$$a_{iU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \times 10^3, \text{ kJ/m}^2 \quad (7.3)$$

gdzie: E_c – skorygowana energia pochłonięta przy złamaniu próbki, J

h – grubość próbki, mm

b – szerokość próbki, mm

Uderzenie próbki z karbem a_{iN} wyznacza się ze wzoru:

$$a_{iN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \times 10^3, \text{ kJ/m}^2 \quad (7.4)$$

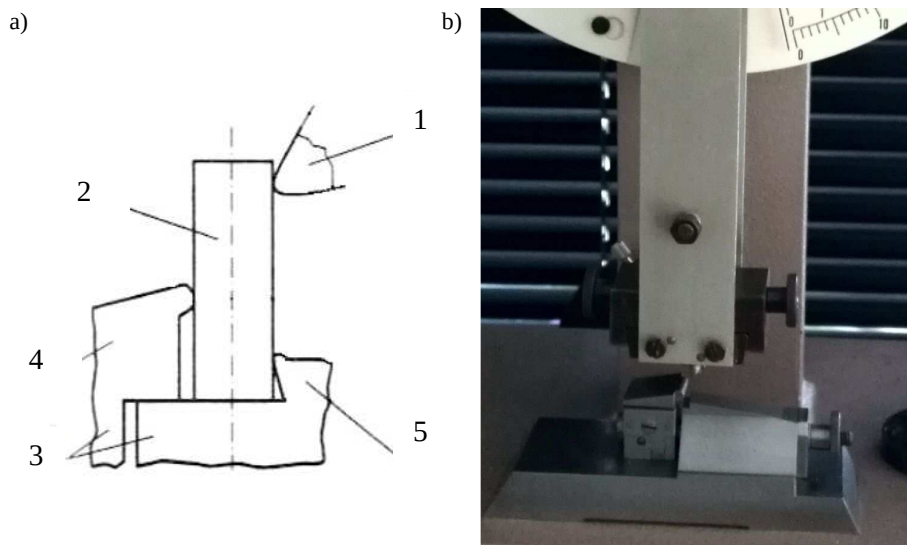
gdzie: b – szerokość próbki pozostała przy podstawie karbu, mm

Metoda Dynstat

Zasada pomiaru uderzeniowości w tej metodzie jest identyczna jak w metodzie Charpy'ego, zaś główną różnicę stanowi sposób zamocowania próbki. Do badań wykorzystywane są próbki o bardzo małych wymiarach, które są zamocowane jednostronnie i pionowo, a styk powierzchni próbki z uchwytem w miejscu podparcia jest liniowy.

Metoda Dynstat ze względu na wykorzystanie do pomiaru próbek o bardzo małych gabarytach, najczęściej 10x15 mm i grubości 1,5–4,5 mm, stosowana jest wówczas, gdy nie ma możliwości wykonania pomiarów uderzeniowości przy pomocy innych metod. Wyniki pomiarów uzyskanych za pomocą tej metody nie są porównywalne z wynikami metod Charpy'ego i Izoda. Ponadto liczebność próby

w tej metodzie musi być dużo większa niż w innych metodach, ponieważ niewielkie wymiary próbek powodują znaczny rozrzut otrzymanych wyników.



Rys. 7.8. Sposób podparcia próbki podczas badania udarności metodą Dynstat: oraz wygląd aparatu Dynstat: a) zasada pomiaru: 1 – ostrze młota, 2 – próbka, 3, 4 – podpory, b) aparat Dynstat firmy Koegel Leipzig

Metoda Dynstat umożliwia oznaczanie:

- udarność próbek bez karbu a_n , jako praca zużyta na dynamiczne złamanie próbki bez karbu, odniesiona do 1 mm^2 przekroju poprzecznego w miejscu złamania,

$$a_n = \frac{A_n}{b \cdot h}, \text{ J/cm}^2 \quad (7.5)$$

- udarność próbek z karbem a_k , jako praca zużyta na dynamiczne złamanie próbki z karbem, odniesiona do 1 mm^2 przekroju poprzecznego w miejscu złamania,

$$a_k = \frac{A_k}{b \cdot h_k}, \text{ J/cm}^2 \quad (7.6)$$

- udarność względna KZ, jako stosunek udarności a_k do udarności a_n wyrażony w procentach.

$$KZ = \frac{a_k}{a_n} 100, \% \quad (7.7)$$

Ramię aparatu Dynstat ustawia się w pozycji „godzina trzecia”, a więc zupełnie inaczej niż w pomiarze wytrzymałości na zginanie. Praktyczne znaczenie pomiarów aparatem Dynstat polega na tym, że próbki o tak małych wymiarach

udaje się wycinać z wielu gotowych wyrobów, co jest nie możliwe przy próbkach w metodzie Charpy'ego.

W metodzie Dynstat stosuje się młoty o energii uderzenia: 0,5, 1,0 oraz 2,0 J. Prędkość spadania ostrza młota wynosi 2,2 m/s. Udarowość a_n wyznaczamy z tych samych zależności (7.1–7.2) jak w metodzie Charpy'ego.

7.2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady badań udarnośći metodą Charpy'ego lub Izoda lub Dynstat w zależności od zaleceń prowadzącego ćwiczenia. Celem ćwiczenia jest również wyznaczenie właściwości udarowych, przy zastosowaniu co najmniej dwóch różnych tworzyw termoplastycznych lub tworzyw zawierających napełniacze organiczne.

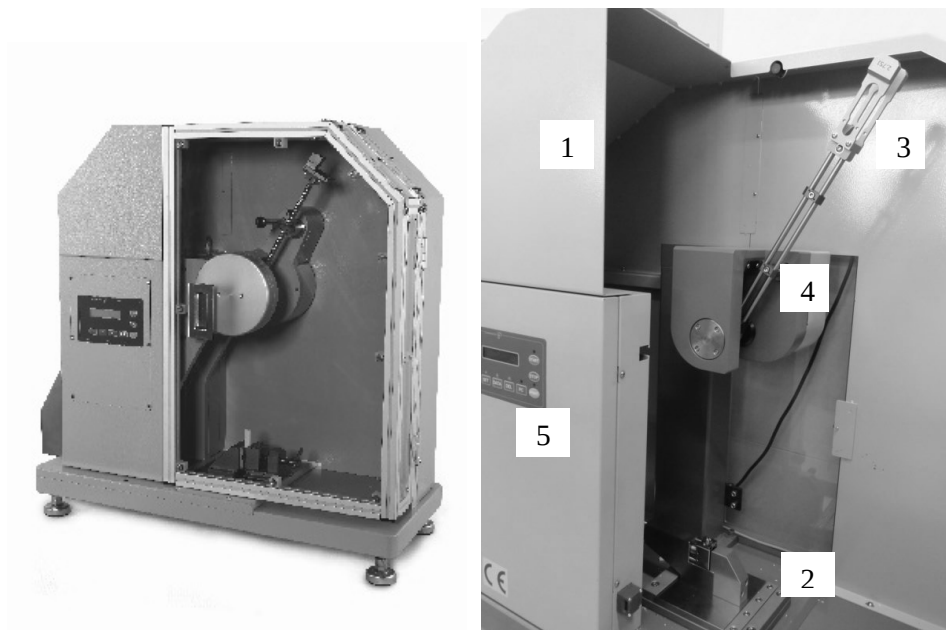
7.3. Stanowisko badawcze

Wyznaczanie właściwości udarowych metodą Charpy'ego lub Izoda przebiega przy zastosowaniu młota udarowego firmy Comatech Testing Machines, typ 639F. Młot udarowy charakteryzuje się sztywną konstrukcją, umożliwiającą wyznaczenie energii zużytej na złamanie próbki. Wartość energii zużytej na złamanie próbki stanowi różnicę początkowej energii potencjalnej młota wahadłowego i energii potencjalnej pozostałej po złamaniu próbki. Skala odczytu energii jest skorygowana na straty spowodowane tarcie i oporem powietrza.

Budowę młota do pomiaru udarnośći przedstawiono na rys. 7.9. Na podstawie korpusu (1) są zamocowane wymienne uchwyty mocujące (2), wymienne dla każdej metody pomiarowej, w których mocuje się próbkę pomiarową. Wahadło (3) ułożyskowane w korpusie młota jest blokowane w górnym położeniu przy pomocy zatrasku elektronicznego (4). Ostrze młota podczas opadania przechodzi w środku między podporami i jest ustawione w taki sposób, że w momencie uderzenia zetknięcie z próbką następuje na całej wysokości próbki.

Do elektronicznego sterowania działaniem maszyny jest wykorzystywany zespół sterowniczy (5) oraz stanowisko komputerowe. Działaniem układu udarowego steruje komputer, zaś odpowiednie oprogramowanie i oprzyrządowanie maszyny umożliwia przeprowadzenie próby udarnośći metodą Charpy'ego, Izoda oraz rozciągania udarowego. Odpowiednie oprogramowanie umożliwia bezpośrednią wizualizację zależności udarnośći od odkształcenia i wszystkich cech udarowych na ekranie monitora.

Na rysunkach 7.10 oraz 7.11 pokazano wygląd oprzyrządowania (uchwytów, wahadeł) do badań udarnośći omawianymi metodami.

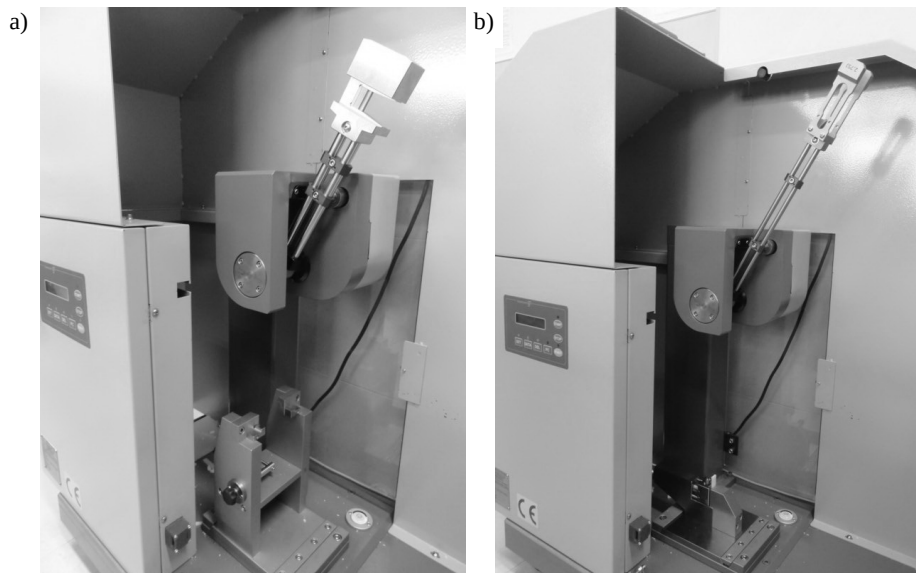


Rys. 7.9. Wygląd młota uderowego Comatech Testing Machines, typ 639F wraz z oprzyrządowaniem do badań uderowości metodą Izoda: 1 – korpus, 2 – uchwyty mocujące, pomiarowa, 3 – wahadło, 4 – zatrzask elektroniczny, 5 – zespół sterowniczy

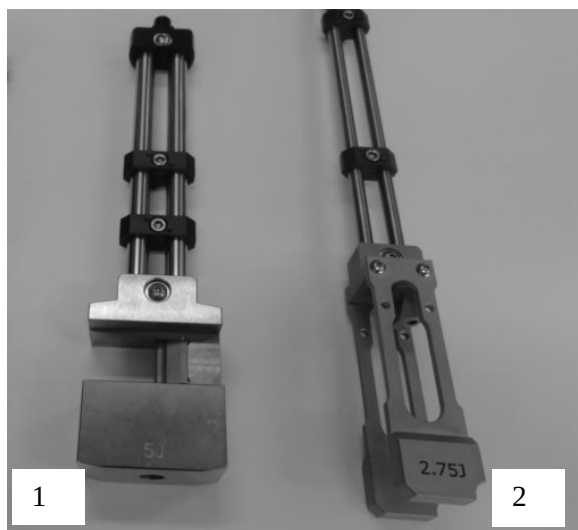
W celu wykonania pomiaru uderowości należy dobrać taki młot wahadłowy, wskazany przez prowadzącego zajęcia, aby miał odpowiedni zapas energii i żądanej prędkości, tak aby na złamanie próbki zużyte zostało nie mniej niż 10% i nie więcej niż 80% zapasu energii młota. Przykładowo, w przypadku metody Izoda należy zastosować wahadło o energii 2,75 lub 5,5 J [5].

Przed rozpoczęciem pomiarów należy uruchomić program sterowania oraz pomiarów młota wahadłowego typ 639F. Ponadto niezbędne jest przeprowadzenie prób kontrolnych bez próbek pomiarowych w celu sprawdzenia, czy całkowite straty na tarcie nie są większe niż dopuszczalne podane w normie.

Zgodnie z wymogami [4, 5] w badaniach należy zastosować próbki odpowiednich typów, zgodnie z zaleceniami prowadzącego. Próbki wykonane są według wytycznych norm dotyczących metod ich przygotowania w procesie wtryskiwania, prasowania, wytłaczania, zgodnie z wymogami normy ISO 3167 lub ISO 294. Próbki z żywicy są otrzymane poprzez odlewanie lub wycinanie z odlanych płyt, natomiast z wyrobów gotowych otrzymuje się je przez wycinanie i obróbkę skrawaniem.



Rys. 7.10. Młot uderowy Comatech Testing Machines, typ 639F – wygląd młota wraz z oprzyrządowaniem do badań uderowości: a) metoda Charpy'ego, b) metoda Izoda



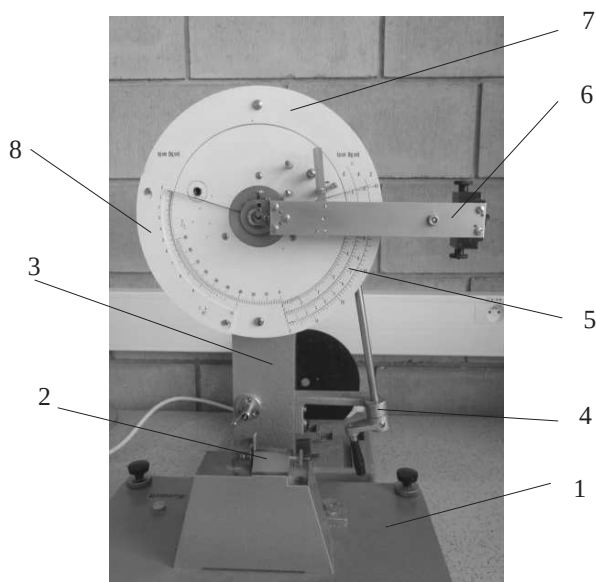
Rys. 7.11. Młot uderowy Comatech Testing Machines, typ 639F: wahadła uderowe do badań uderowości: 1 – metodą Charpy'ego, 2 – metodą Izoda

Po wykonaniu pomiarów próbki umieszcza się ją na podporach przyrządu w taki sposób, aby ostrze młota trafiło w środek próbki. W przypadku próbki z karbem musi być ona ustawiona tak, aby środek karbu wypadł dokładnie w płaszczyźnie ruchu ostrza młota. Jeśli pomiar uderowości jest wykonywany

metodą z karbem, próbkę układa się na podporach tak, aby wahadło młota uderzało w powierzchnię przeciwną do karbu. Przy badaniu próbek o niestandardowych wymiarach (np. próbki wycinane z płyt o grubości poniżej 10 mm), za podporami umieszcza się płytki stalowe o grubości uzupełniającej grubość próbek do wymiarów standardowych. Po ułożeniu w opisany sposób próbki na podporach następuje zwolnienie blokady młota, czynność tę należy wykonać ostrożnie i bez wstrząsów, które mogą wpłynąć na zmianę położenia płytki oraz na dokładność wyznaczenia energii zaabsorbowanej przez próbkę podczas uderzenia młota.

Badania udarności metodą Dynstat, zgodnie z odpowiednią normą [6] przeprowadza się na stanowisku pomiarowym wyposażonym w urządzenie Dynstat oraz suwmiarkę.

Głównymi elementami składowymi urządzenia Dynstat, przedstawionego na rys. 7.12, są masywna podstawa (1) i statyw (2) oraz umieszczona na nim właściwa część pomiarowa. Część pomiarowa urządzenia składa się z układu (2) mocowania próbki, wahadła (3) oraz dwóch tarcz współśrodkowych, z których zewnętrzna (7) jest stała, a wewnętrzna jest obracana na osi poziomej za pomocą mechanizmu ślimakowego i korby (4). Również współosiowo, z wahadłem i tarczami, są zamocowane dwa wskaźniki odczytu przeprowadzanych pomiarów. Skala do pomiarów udarności (8) jest zamocowana na tarczy stałej po stronie lewej tarczy nieruchomej, natomiast momentu zginającego (5) znajduje się na tarczy po stronie prawej.



Rys. 7.12. Wygląd urządzenia Dynstat do pomiarów udarności: 1 – podstawa, 2 – układ mocowania próbki podczas pomiarów udarności, 3 – statyw, 4 – korba mechanizmu ślimakowego, 5 – skala momentu zginającego, 6 – wahadło, 7 – tarcza ruchoma, 8 – skala do pomiarów udarności

Zasada pomiaru udarności w tej metodzie polega na dynamicznym uderzeniu w próbkę tworzywa w wyniku działania wahadła uderowego.

Do badań wykorzystywane są próbki o wymiarach 10x15 mm i grubości 1,5–4,5 mm. Są one zamocowane jednostronnie i pionowo a styk powierzchni próbki z uchwytem w miejscu podparcia jest liniowy. W metodzie Dynstat stosuje się młot o energii uderzenia: 0,5, 1,0 lub 2,0 J. Prędkość spadania ostrza młota wynosi 2,2 m/s. Udarność a_n wyznaczamy z tej samej zależności (7.1–7.2) jak w metodzie Charpy'ego.

7.4. Program ćwiczenia

W programie badań przyjęto jako czynniki badane:

1) bezpośrednio

- szerokość próbki w metodzie Charpy'ego, b_U , mm,
- grubość próbki w metodzie Charpy'ego, h , mm,
- energię uderzenia na złamanie próbki w metodzie Charpy'ego, W_B , kJ.
- szerokość próbki w metodzie Izoda, b , mm,
- grubość próbki w metodzie Izoda, h , mm,
- energię uderzenia użytą na złamanie próbki w metodzie Izoda, W_B , kJ.
- szerokość próbki w metodzie Dynstat, b , mm,
- grubość próbki w metodzie Dynstat, h , mm,
- energię uderzenia użytą na złamanie próbki w metodzie Dynstat, W_B , kJ.

2) pośrednio

- udarność w metodzie Charpy'ego, a_{cU} , kJ/m²,
- udarność z karbem w metodzie Izoda, a_{iU} , kJ/m²,
- udarność w metodzie Dynstat, a_n , kJ/m².

Czynnikiem zmiennym jest:

- rodzaj badanego tworzywa (minimum dwa rodzaje tworzywa lub jeden rodzaj tworzywa z napełniaczami dla każdej stosowanej metody),
- warunki technologiczne otrzymywania próbek w procesie wytłaczania lub wtryskiwania.

Czynniki stałymi są:

- elementy konstrukcyjne przyrządu pomiarowego (młota uderowego, urządzenia Dynstat),
- rodzaj wahadła w metodzie Charpy'ego, Izoda lub Dynstat.

Czynniki zakłócające, których wpływ jest pomijalnie mały, to przede wszystkim niestabilność prądu elektrycznego, zmiany temperatury otoczenia, wilgotności tworzywa wejściowego oraz wilgotności względnej powietrza.

7.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

W celu prawidłowego wykonania ćwiczenia należy przeprowadzić następujących czynności:

- 1) Przygotować próbki o kształcie odpowiadającej metodzie pomiaru udarności, otrzymanych w procesie wtryskiwania lub przy pomocy praski wyciąć próbki, minimum 3 próbki dla każdego rodzaju tworzywa, do badań udarności metodą Charpy'ego, Izoda lub Dynstat.
- 2) Zmierzyć grubość oraz szerokość odcinka pomiarowego próbek i na tej podstawie obliczyć powierzchnię początkową A przekroju poprzecznego próbek.
- 3) Zamontować oprzyrządowanie (uchwyty, wahadło) do oznaczania udarności metodą Charpy'ego, Izoda lub Dynstat.
- 4) Uruchomić program sterujący młota udarowego, wpisać dane pomiarowe dla pierwszej badanej próbki w programie komputerowym.
- 5) Zamocować pierwszą próbkę w uchwytach pomiarowych maszyny.
- 6) Przeprowadzić pomiar udarności zgodnie z zaleceniami zawartymi w programie sterującym.
- 7) Wyznaczyć czynniki badane bezpośrednio i pośrednio, zgodnie z programem ćwiczenia.
- 8) Powtórzyć czynności dla pozostałych próbek, minimum 3 próbek dla każdego rodzaju tworzywa.
- 9) Powtórzyć wszystkie opisane czynności dla wyznaczenia udarności metodą rozciągania udarowego.

Udarność tworzyw badana metodą Charpy, Izoda lub Dynstat wyznaczyć z zależności 7.1 oraz 7.2 pokazanych w Ad. 7.1 ćwiczenia.

7.6. Wyniki, sprawozdanie

Wyniki pomiarów i badań należy zestawić w tabelach zamieszczonych we wzorze sprawozdania. Prawidłowo sporządzone sprawozdanie powinno zawierać: cel ćwiczenia, przebieg ćwiczenia, wyniki pomiarów i obliczeń udarności zestawione w tabeli, wnioski wynikające z przeprowadzonego ćwiczenia.

Literatura

- [1] *Dokumentacja techniczno-ruchowa młota wahadłowego Comatech Testing Machines typ 639F*, Lublin 2013.
- [2] Sikora R., *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.

- [3] Broniewski T. i inni, *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [4] PN-EN ISO 179:2001. *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie udarności metodą Charpy'ego*.
- [5] PN-EN ISO 180:2004. *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie udarności metoda Izoda*.
- [6] PN-C 89028:1968. *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie udarności za pomocą aparatu – typ Dynstat*.

Politechnika Lubelska Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych Laboratorium:			
Temat ćwiczenia: Udarność		Nr ćwiczenia	Data wykonania
Nazwisko i imię	Ocena	Grupa	Semestr
			Rok akademicki

1. Cel ćwiczenia

2. Charakterystyka badań

3. Przebieg ćwiczenia

4. Wyniki

Tabela 1

Wyniki pomiarów i obliczeń wielkości charakteryzujących
badania udarności metodą Charpy'ego

Lp.	Rodzaj tworzywa	b_U mm	h mm	t_k mm	W_B kJ	Kąt °	a_{cU} kJ/m ²	$\overline{a_{cU}}$ kJ/m ²
1								
2								
3								
4								
5								
6								

Tabela 2

Wyniki pomiarów i obliczeń wielkości charakteryzujących
badania udarności metodą Dynstat

Lp.	Rodzaj tworzywa	b mm	h mm	t_k mm	A_n kJ	a_n kJ/m ²	$\overline{a_n}$ kJ/m ²
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Tabela 3

Wyniki pomiarów i obliczeń wielkości charakteryzujących
badania udarności metodą Izoda

Lp.	Rodzaj tworzywa	b_N mm	h mm	t_k mm	E_c kJ	a_{iU} kJ/m ²	$\overline{a_{iU}}$ kJ/m ²
1							
2							
3							
4							
5							
6							

5. Wnioski

Data Podpis

8. Rozciąganie udarowe

8.1. Wiadomości wstępne

Układy mechaniczne, jak maszyny, elementy maszyn, konstrukcje budowlane itp., poddawane są obciążeniom, często o charakterze szybkozmiennym czy dynamicznym. Udowodniono, że różnego typu materiały, które podczas obciążeń statycznych mają podobne właściwości wytrzymałościowe przy badaniach udarności wykazują odmienne zdolności do pękania. Sprawia to, że wyniki prób statycznych nie są istotne przy ocenie możliwości przenoszenia obciążeń przez materiał.

Próby udarowe klasyfikuje się pod względem rodzaju wywołanego stanu naprężenia w próbce. Wyróżnia się wówczas próby udarowe zginania, rozciągania, ściskania i skręcania. Wynikiem próby jest zniszczenie materiału.

Udarność różnych tworzyw polimerowych badanych w temperaturze normalnej są zróżnicowane. Najmniejszą udarność wykazują tworzywa o temperaturze kruchości wyższej od temperatury normalnej (np. polistyren, polimetakrylan metylu), a więc tworzywa, w których podczas badania istnieją duże siły międzycząsteczkowe. Udarność maleje także wraz ze wzrostem stopnia krystaliczności i wielkości krystalitów oraz ze spadkiem masy cząsteczkowej. W porównywalnych temperaturach tworzywa usieciowane wykazują większą udarność od nieusieciowanych. Zwiększenie udarności można uzyskać przez modyfikację tworzyw odpowiednimi środkami pomocniczymi np. napelniaczami czy zmiękczacami, które to substancje zmniejszają oddziaływania międzycząsteczkowe.

Badania udarności należą do grupy dynamicznych metod badań właściwości tworzyw polimerowych. Udarność jest miarą kruchości materiałów, a jej badanie polega na określeniu pracy potrzebnej do dynamicznego zniszczenia próbki, przypadającej na jednostkę pola powierzchni jej przekroju poprzecznego. Znanych jest kilka metod badania udarności, ale trzy z nich mają największe znaczenie, są to: metoda Charpy'ego, badanie na przyrządzie Dynstat i metoda Izoda. W tych metodach wykorzystuje się jako przyrządy pomiarowe młoty wahadłowe. Innym rodzajem badania dynamicznego jest rozciąganie udarowe.

Udarowa próba rozciągania polega na rozerwaniu próbki lub gotowego elementu poprzez jednorazowe uderzenie. Badanie to można określić jako próbę rozciągania ze względnie dużą prędkością odkształcenia, zaś jej warunki zostały przedstawione w normie PN-EN ISO 8256:2006 „Tworzywa sztuczne – Oznaczanie wytrzymałości na udarowe rozciąganie.”

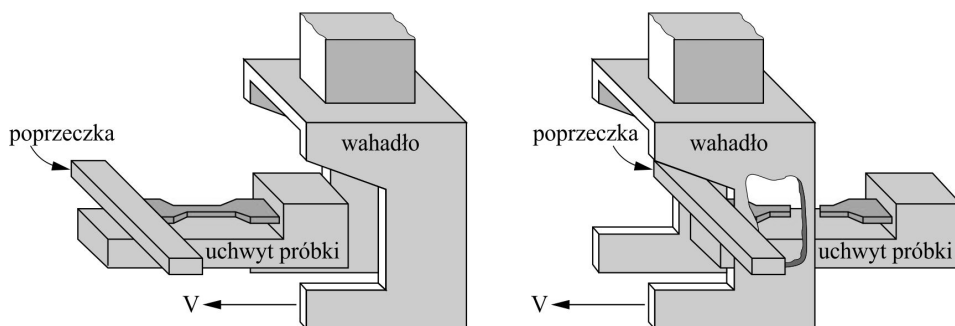
Badania rozciągania udarowego wykonuje się wówczas, gdy niemożliwe jest wykonanie pomiarów udarności metodą Charpy'ego lub Izoda. Ma to miejsce w przypadku próbek cienkich, których grubość nie przekracza 4 mm oraz o małej sztywności, kiedy próbka przy uderzeniu odkształca się ale nie pęka, nie ulega zniszczeniu.

Badania rozciągania udarowego wykorzystuje się do określenia właściwości materiałów polimerowych, w szczególności w funkcji właściwości strukturalnych tworzywa oraz parametrów przetwórstwa.

Zerwanie próbki odbywa się przez pojedyncze uderzenie w najniższym położeniu ruchu wahadła układu do rozciągania udarowego. Próbka w chwili zerwania jest ułożona poziomo (rys. 8.1). W chwili uderzenia jeden koniec próbki jest przetrzymywany albo przez ramię, albo przez wahadło, natomiast drugi koniec przez uchwyt poprzeczny. Sposób mocowania próbki determinuje metodę pomiaru, A lub B. Metoda A – próbka zamocowana do podpory ramy. Metoda B – kształtka opada razem z wahadłem.

W metodzie A próbka wiósełkowa mocowana jest na końcu w urządzeniu zaciskowym. Na drugim końcu próbki mocowane jest jarzmo poprzeczne. Podczas badania młot udarnościowy uderza w jarzmo poprzeczne i obciąża próbkę w kierunku rozciągania, aż do zerwania. Część potencjalnej pracy uderzenia młota zużyta jest na poruszenie jarzma. Inna część tej pracy zużyta jest przez odkształcenie próbki. Wyniki prób tej samej kombinacji młot – jarzmo są bezpośrednio porównywalne

Energię zerwania E_z określa się na podstawie energii kinetycznej oddawanej przez wahadło podczas zrywania próbki. Należy również wprowadzić poprawki uwzględniające energię odrzutu (metoda A) lub energie odbicia (metoda B) uchwytu poprzecznego.



Rys. 8.1. Zasada rozciągania udarowego [www.ides.com]

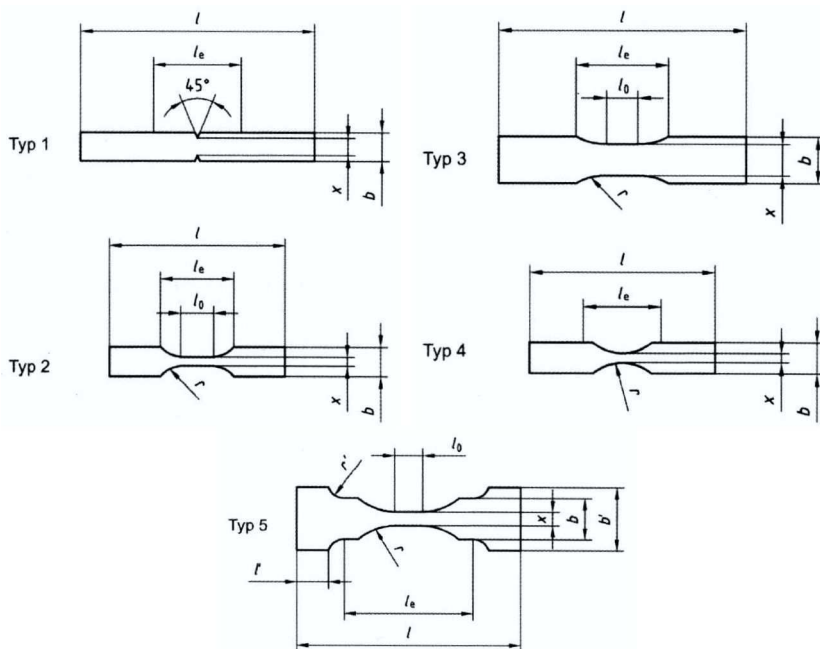
Zgodnie z normą [6] do badań rozciągania udarowego stosuje się próbki pięciu typów o wymiarach podanych w tabeli 8.1 i przedstawionych przykładowo na rys. 8.2. Próbkę wykonuje się według wytycznych odpowiednich norm dotyczących metod ich przygotowania, stosując zalecenia podane w szczegółowych normach przedmiotowych na badany rodzaj tworzywa. Przykładowo próbki z tworzyw termoutwardzalnych są wykonywane metodą prasowania, zaś z tworzyw termoplastycznych poprzez wtryskiwanie lub wytłaczanie. Próbki z żywicy są otrzymywane poprzez odlewanie lub wycinanie z odlanych płyt, natomiast

z wyrobów gotowych otrzymuje się je przez wycinanie i obróbkę skrawaniem. Próbki pomiarowe nie mogą wykazywać zwichrowania i muszą mieć wzajemnie prostopadłe pary równoległych do siebie powierzchni, które powinny być wolne od rys, zapadnięć, pęcherzy i podobnych defektów. Próbki z tworzyw warstwowych (laminatów) wykonuje się zarówno wzdłuż jak i w poprzek włókien. Grubość próbki z karbem liczy się od głębokości wykonanego odpowiednim frezem karbu, pomiar jej wymiarów przeprowadza się z dokładnością $\pm 0,02$ mm.

Tabela 8.1

Wymiary próbek do oznaczania rozciągania uderowego

Typ próbki	Wymiary próbek, mm			Swobodna długość między uchwytami l_e , mm	Promień krzywizny, r , mm
	Długość l	Szerokość b	Przewężenie pomiarowe x		
1	80 ± 2	$15 \pm 0,5$	$6 \pm 0,2$	30	-
2	60 ± 2	$10 \pm 0,5$	$3 \pm 0,2$	25	10 ± 1
3	80 ± 2	$15 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	30	20 ± 1
4	60 ± 2	$10 \pm 0,2$	$3 \pm 0,2$	25	15 ± 1
5	80 ± 2	$15 \pm 0,2$	$5 \pm 0,2$	50	20 ± 1



Rys. 8.2. Wymiary i kształty próbek do rozciągania uderowego [4]

Wytrzymałość na rozciąganie udarowe próbek bez karbu a_{tU} oblicza się ze wzoru

$$a_{tU} = \frac{E_s}{b_r \cdot t_r} \times 10^3, \text{ kJ/m}^2 \quad (8.1)$$

zaś wytrzymałość na rozciąganie udarowe z karbem a_{tN}

$$a_{tN} = \frac{E_s}{b_r \cdot t_{rk}} \times 10^3, \text{ kJ/m}^2 \quad (8.2)$$

gdzie: E_s – energia uderzenia podczas rozciągania udarowego, kJ,

b_r – szerokość próbki, mm,

t_r, t_{rk} – grubość próbki bez karbu i z karbem, mm.

8.2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady badań udarności metodą rozciągania udarowego. Celem ćwiczenia jest również wyznaczenie właściwości udarowych metodą rozciągania udarowego, dla co najmniej dwóch różnych tworzyw termoplastycznych lub tworzyw zawierających napełniacze organiczne.

8.3. Stanowisko badawcze

Wyznaczanie właściwości udarowych metodą rozciągania udarowego przebiega przy zastosowaniu młota udarowego firmy Comatech Testing Machines, typ 639F. Młot udarowy charakteryzuje się sztywną konstrukcją, umożliwiającą wyznaczenie energii zużytej na złamanie próbki. Wartość ta stanowi różnicę początkowej energii potencjalnej młota wahadłowego i energii potencjalnej pozostałej po złamaniu próbki. Skala odczytu energii jest skorygowana o straty spowodowane tarciami i oporem powietrza.

Budowę młota do pomiaru udarności przedstawiono na rys. 8.3. Na podstawie korpusu (1) są zamocowane wymienne uchwyty mocujące (2), wymienne dla każdej metody pomiarowej, w których w różny sposób mocuje się próbkę pomiarową. Wahadło (3) ułożyskowane w korpusie młota, jest blokowane w górnym położeniu przy pomocy zatrzasku elektronicznego (4). Ostrze młota podczas opadania przechodzi między uchwytami i jest ustawione w taki sposób, że w momencie uderzenia zetknięcie z próbką następuje na całej wysokości próbki.

Do elektronicznego sterowania działaniem maszyny jest wykorzystywany zespół sterowniczy (5) oraz stanowisko komputerowe. Działaniem układu udarowego steruje komputer, zaś odpowiednie oprogramowanie i oprzyrządowanie maszyny umożliwia przeprowadzenie próby udarności metodą rozciągania uda-

rowego. Oprogramowanie umożliwia bezpośrednią wizualizację zależności udarności od odkształcenia i wszystkich cech uderzeniowych na ekranie monitora.

W celu wykonania pomiaru udarności należy dobrać takie wahadło, wskazany przez prowadzącego zajęcia, aby miał odpowiedni zapas energii i żądanej prędkości, tak aby na złamanie próbki zużyte zostało nie mniej niż 10% i nie więcej niż 80% zapasu energii młota [5].

Na rysunkach 8.4 oraz 8.5 pokazano wygląd oprzyrządowania (uchwytów, wahadeł) do badań udarności omawianymi metodami.



Rys. 8.3. Wygląd młota uderowego Comatech Testing Machines, typ 639F wraz z oprzyrządowaniem do badań rozciągania uderowego

Przed rozpoczęciem pomiarów należy uruchomić program sterowania oraz pomiarów młota wahadłowego typ 639F. Ponadto niezbędne jest przeprowadzenie prób kontrolnych bez próbek pomiarowych w celu sprawdzenia, czy całkowite straty na tarcie nie są większe niż dopuszczalne podane w normie.

Zgodnie z normami [5, 6] w badaniach należy zastosować próbki odpowiednich typów, zgodnie z zaleceniami prowadzącego. Próbki wykonane są według wytycznych odpowiednich norm dotyczących metod ich przygotowania w procesie wtryskiwania, prasowania, wytłaczania, zgodnie z wymogami normy ISO 3167 lub ISO 294. Próbki z żywicy są otrzymane poprzez odlewanie lub wycinanie z odlanych płyt, natomiast z wyrobów gotowych otrzymuje się je przez wycinanie i obróbkę skrawaniem.

Po wykonaniu pomiarów wymiarów próbki umieszcza się ją w uchwytach przyrządu (rys. 8.5) w taki sposób, aby ostrze młota trafiło w środek próbki.



Rys. 8.4. Młot uderowy Comatech Testing Machines, typ 639F; wygląd młota wraz z oprzyrządowaniem do badań rozciągania uderowego, oraz odpowiadającego stosowanej metodzie, wahadła uderowego



Rys. 8.5. Wygląd uchwytu mocowania próbki wraz z młotem podczas próby rozciągania uderowego

W przypadku próbki z karbem musi być ona ustawiona tak, aby środek karbu wypadł dokładnie w płaszczyźnie ruchu ostrza młota. Jeśli pomiar udarności jest wykonywany metodą z karbem, próbkę układa się na podporach tak, aby waha-
dło młota uderzało w powierzchnię przeciwną do karbu. Przy badaniu próbek o niestandardowych wymiarach (np. próbki wycinane z płyt o grubości poniżej

10 mm), za podporami umieszcza się płytki stalowe o grubości uzupełniającej grubość próbek do wymiarów standardowych. Po zamocowaniu próbki w uchwytach następuje zwolnienie blokady młota. Czynność tę należy wykonać ostrożnie i bez wstrząsów, które mogą wpłynąć na zmianę położenia płytki oraz na dokładność wyznaczenia energii zaabsorbowanej przez próbkę podczas uderzenia młota.

8.4. Program ćwiczenia

W programie badań przyjęto jako czynniki badane:

1) bezpośrednio

- szerokość próbki w metodzie rozciągania udarowego, b_r , mm,
- grubość próbki bez karbu i z karbem w metodzie rozciągania udarowego, t_r , t_{rk} , mm,
- energię uderzenia podczas rozciągania udarowego, E_s , kJ.

2) pośrednio

- wytrzymałość na rozciąganie udarowe próbek bez karbu a_{tU} , kJ/m²,
- wytrzymałość na rozciąganie udarowe próbek z karbem a_{tN} , kJ/m².

Czynnikiem zmiennym jest:

- rodzaj badanego tworzywa (minimum dwa rodzaje tworzywa lub jeden rodzaj tworzywa z napelniaaczami dla kaźdej stosowanej metody),
- warunki technologiczne otrzymywania próbek w procesie wytłaczania lub wtryskiwania.

Czynnikiami stałymi są:

- elementy konstrukcyjne młota udarowego,
- rodzaj wahadła w metodzie rozciągania udarowego.

Czynniki zakłócające, których wpływ jest pomijalnie mały, to przede wszystkim niestabilność prądu elektrycznego, zmiany temperatury otoczenia, wilgotności tworzywa wejściowego oraz wilgotności względnej powietrza.

8.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

W celu prawidłowego wykonania ćwiczenia należy przeprowadzić następujących czynności:

- 1) Przygotować minimum 3 próbki dla kaźdego rodzaju tworzywa o kształcie odpowiadającej metodzie pomiaru udarności, otrzymanych w procesie wtryskiwania lub wyciąć próbki przy pomocy prasy ręcznej, wyposażonej w odpowiedni wykrojek.

- 2) Zmierzyć grubość oraz szerokość odcinka pomiarowego próbek i na tej podstawie obliczyć powierzchnię początkową A przekroju poprzecznego próbek.
- 3) Zamontować oprzyrządowanie (uchwyty, wahadło) do oznaczania udarności metodą rozciągania udarowego.
- 4) Uruchomić program sterujący młota udarowego, wpisać dane pomiarowe dla pierwszej badanej próbki w programie komputerowym.
- 5) Zamocować pierwszą próbkę w uchwytach pomiarowych maszyny.
- 6) Przeprowadzić pomiar udarności zgodnie z zaleceniami zawartymi w programie sterującym.
- 7) Wyznaczyć czynniki badane bezpośrednio i pośrednio, zgodnie z programem ćwiczenia.
- 8) Powtórzyć czynności dla pozostałych próbek, minimum 3 dla każdego rodzaju tworzywa.

Udarność tworzyw badana metodą rozciągania udarowego należy wyznaczyć z zależności 8.1–8.4 przedstawione w Ad. 8.1 ćwiczenia. Pozostałe wielkości występujące we wzorach zostały opisane w programie ćwiczenia.

8.6. Wyniki, sprawozdanie

Wyniki pomiarów i badań należy zestawić w tabeli zamieszczonej we wzorze sprawozdania. Prawdłowo sporządzone sprawozdanie powinno zawierać: cel ćwiczenia, przebieg ćwiczenia, wyniki pomiarów i obliczeń udarności zestawione w tabeli, wnioski wynikające z przeprowadzonego ćwiczenia.

Literatura:

- [1] *Dokumentacja techniczno-ruchowa młota wahadłowego Comatech Testing Machines typ 639F*, Lublin 2013.
- [2] Sikora R., *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
- [3] Broniewski T. i inni, *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [4] PN-EN ISO 8256:2006. *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie udarowe*.

Politechnika Lubelska Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych Laboratorium:			
Temat ćwiczenia: Rozciąganie udarowe		Nr ćwiczenia	Data wykonania
Nazwisko i imię	Ocena	Grupa	Semestr
			Rok akademicki

1. Cel ćwiczenia

2. Charakterystyka badań

3. Przebieg ćwiczenia

4. Wyniki

Tabela 1

Wyniki pomiarów i obliczeń wielkości charakteryzujących
badanie rozciągania udarowego

Lp.	Rodzaj tworzywa	b_r mm	t_r mm	t_{rk} mm	E_s kJ	a_{tU} kJ/m ²	$\overline{a_{tU}}$ kJ/m ²	a_{tN} kJ/m ²	$\overline{a_{tN}}$ kJ/m ²
1									
2									
3									
4									
5									
6									

a_{tU}, a_{tN} kJ/m ²					
rodzaj materiału					

5. Wnioski

Data Podpis

9. Właściwości tribologiczne

9.1. Wiadomości wstępne

Tworzywa polimerowe z uwagi na swoje specyficzne właściwości, należą do jedynej grupy materiałów, które stosuje się zarówno w węzłach tarcia, gdzie jest wymagane uzyskanie jak najmniejszych oporów ruchu, występujących pomiędzy współdziałającymi elementami konstrukcyjnymi (np. łożyska ślizgowe), jak również tam, gdzie zachodzi potrzeba uzyskania oporów o jak największych wartościach (np. okładziny hamulców). Właściwości tribologiczne charakteryzują wiele zjawisk fizycznych, chemicznych i cieplnych, związanych z działaniem określonej pary materiałowej, wywołanych w wyniku tarcia. Powszechne stosowanie tworzyw w tego typu skojarzeniach, wynika przede wszystkim z możliwości uzyskania określonych właściwości tribologicznych elementów konstrukcyjnych, poprzez odpowiednie przeprowadzanie procesu przetwórstwa, zmianę składu chemicznego lub struktury tworzywa, dodanie odpowiedniego rodzaju i ilości składników dodatkowych (np. napełniaczy) zmniejszających lub zwiększających tarcie [1, 2, 3].

Opór tarcia zwykle określa się poprzez określenie siły tarcia lub współczynnika tarcia μ definiowanego jako stosunek siły stycznej T (siły tarcia) do obciążenia próbki siłą normalną N (siły nacisku normalnego), przy ustalonych warunkach kontaktu tribologicznego [3].

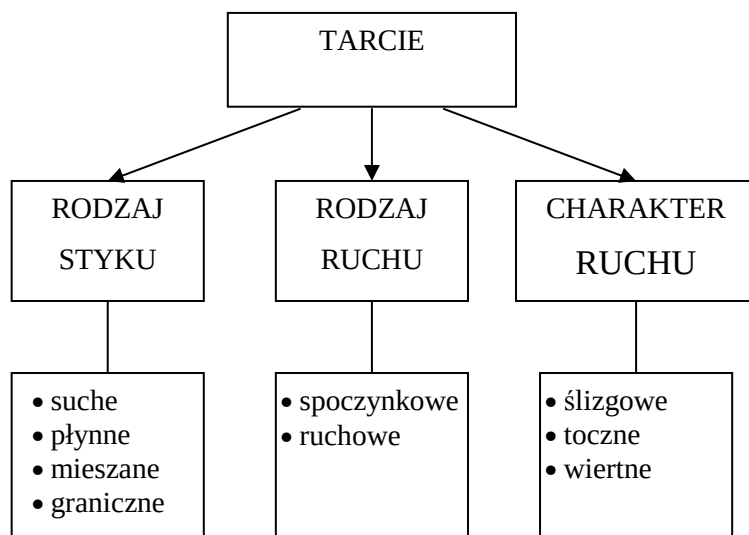
$$\mu = \frac{T}{N} \quad (9.1)$$

Tarcie definiuje się jako opór, jaki występuje przy próbie przemieszczenia jednego ciała po powierzchni drugiego. W większości przypadków tarcia towarzyszy ścieranie materiału. Zużycie tribologiczne materiałów polimerowych należy rozpatrywać jako proces nieodwracalny będący skutkiem zjawisk zachodzących równocześnie – adhezji, histerezy i kohezji [2].

W zależności od przyjętego kryterium klasyfikacji (rys. 9.1), rodzaju ruchu, dodatkowego udziału środków smarujących oraz rodzaju styku można wyróżnić kilka rodzajów i odmian tarcia.

W literaturze można odnaleźć wiele teorii tarcia ciał stałych, którymi są także tworzywa polimerowe wykorzystywane w węzłach tarcia maszyn i urządzeń. Adhezyjna teoria tarcia zakłada, że styk ciał nie zachodzi na powierzchni nominalnej, ale na rzeczywistej. Mikronierówności znajdujące się na powierzchniach ulegają deformacji, a w strefie styku występuje silna adhezja, a siłą tarcia jest potrzebna do zerwania kontaktów adhezyjnych. Według molekularnej teorii tarcia w przypadku powierzchni gładkich tarcie zachodzi w obszarze sił międzycząsteczkowych, czyli sił oddziaływań pomiędzy powłokami elektronowymi atomów stykających się ciał. Więc siły przyciągania międzycząsteczkowego

powinny być uwzględniane w teoriach tarcia. Teoria adhezyjno-odkształceniowa (mechaniczna) łączy oddziaływania mechaniczne będących w kontakcie trybologicznym ciał z przyciąganiem międzycząsteczkowym. Uwzględnia zarówno szczypanie się mikronierówności powierzchni ciał, siły adhezyjne wynikające z oddziaływania sił międzycząsteczkowych oraz rzeczywistą powierzchnię styku ciał. Teoria energetyczna postuluje istnienie bilansu energetycznego procesów tarcia zewnętrznego. Zjawiska cieplne, akustyczne, elektryczne oraz procesy zużywania powodują straty energetyczne. Pracę sił tarcia można określić poprzez zsumowanie składowych energetycznych, na które składają się energia przetworzona na ciepło oraz energia rozproszona [2, 3].



Rys. 9.1. Klasyfikacja tarcia w zależności od rodzaju styku oraz rodzaju i charakteru ruchu

Węzły tarcia stanowią ważne elementy konstrukcji maszyn i urządzeń, mają zasadniczy wpływ na ich trwałość i niezawodność. W przypadku ich nieprawidłowego funkcjonowania powodują straty energii wskutek tarcia, a w konsekwencji narastającego zużycia mogą utrudniać lub wręcz uniemożliwiać prawidłowe działanie maszyny lub urządzenia. Przy przyjęciu określonego węzła tarcia jako układu tribotechnicznego i przeprowadzeniu kompleksowej analizy wpływu najistotniejszych czynników na przebieg procesu tarcia, można bezpośrednio wpływać na jego działanie oraz tak dobrać poszczególne elementy konstrukcyjne, aby współdziałająca para materiałowa miała zadowalające właściwości tribologiczne.

Strukturę układu tribotechnicznego rozpatruje się jako zbiór elementów układu (ilość ciał, z których składa się węzeł tarcia, rodzaj ciała dodatkowo biorące-

go udział w procesie tarcia, a będącego na przykład środkiem smarującym, zanieczyszczeniami lub produktami zużycia tribologicznego), ich właściwości (rodzaj tworzywa lub tworzyw i ich skład chemiczny, gęstość, lepkość, struktura warstwy wierzchniej i inne) oraz wzajemnych relacji między nimi (rodzaj styku (np. styk Hertza), mechanizm tarcia, rodzaj smarowania oraz mechanizm zużycia). W przypadku układów tribotechnicznych z tworzyw, największe znaczenie ma tarcie ślizgowe suche, kiedy pomiędzy współdziałającymi powierzchniami nie występuje środek ślizgowy [1, 2]. Charakterystyka działania poszczególnych węzłów tarcia, traktowanych jako układy tribotechniczne, tworzywowych par materiałowych oraz określenie ich właściwości tribologicznych jest możliwe w wyniku przeprowadzenia różnego rodzaju badań laboratoryjnych, na podstawie których, w określonych warunkach można wyznaczyć wielkości fizyczne charakteryzujące ilościowo i jakościowo przebieg tego procesu. Do wielkości tych zalicza się: wartość siły tarcia, współczynnik tarcia, temperaturę tarcia, drgania tarciove jak również wielkości określające rodzaj i charakter zużycia.

Zużycie cierne elementów układu tribotechnicznego, które zwykle towarzyszy tarcu, przejawia się zmianą morfologii powierzchni oraz często utratą objętości materiału wskutek tarcia. Rozróżnia się jego trzy podstawowe rodzaje: zmęczeniowe, adhezyjne oraz abrazyjne. Zużycie zmęczeniowe następuje wskutek działania zmiennych naprężeń i drgań wywołanych oddziaływaniami adhezyjnymi pomiędzy mikronierównościami powierzchni elementów układu tribotechnicznego. Oznaki tego typu zużycia pojawiają się z reguły po stosunkowo długim czasie kontaktu ciernego i mają postać mikropęknięć prostopadłych do kierunku poślizgu, z czasem się poszerzających i powodujących wykruszanie materiału. Zużycie adhezyjne zachodzi w warunkach dużego oporu tarcia, dużej szybkości poślizgu oraz podwyższonej temperatury. Dochodzi wtedy do odrywania mikronierówności materiału o mniejszej wytrzymałości przez szczepienie z mikronierównościami materiału o większej wytrzymałości. Zużycie abrazyjne (ścierne) polega na usuwaniu materiału z powierzchni będących w kontakcie tribologicznym, wskutek ścinania przez twarde wtrącenia obecne na ich powierzchniach lub pomiędzy nimi [3].

Badania zużycia ciernego tworzyw występujących w układach tribotechnicznych są przydatne zarówno przy projektowaniu poszczególnych elementów konstrukcyjnych, jak również przy prognozowaniu wskaźników eksploatacyjnych elementów maszyn. Znane są liczne metody badań, za pomocą których można określać wielkości charakteryzujące właściwości tribologiczne współdziałających par materiałowych z tworzyw, będących zarówno w stanie szklistym, jak również wysokoelelastycznym [1, 4]. Metody te jednak różnią się między sobą sposobem pomiaru siły tarcia, momentu tarcia jak również metodyką obliczania, na przykład wartości współczynnika tarcia lub odporności na ścieranie (ścieralności). Wszystko to powoduje, że wyniki tribologicznych badań laboratoryjnych, można porównywać ze sobą tylko w zakresie poszczególnych metod badawczych, z uwzględnieniem takich samych warunków prowadzenia pomiarów.

Najczęściej stosowane metody badania odporności na ścieranie polegają na:

- ścieraniu próbek nieruchomych na obracających się tarczach pokrytych materiałem ściernym,
- ścieraniu próbek przesuwających się po obracających się walcach pokrytych materiałem ściernym,
- ścieraniu próbek obracających się i przesuwających się po obracających się walcach pokrytych materiałem ściernym,
- ścieraniu próbek na tarczy pokrytej materiałem ściernym i wykonującej ruchy wahadłowe.

Ze znanych i dostępnych metod badania odporności na ścieranie tworzyw, najważniejsze znaczenie ma metoda Schoppera – Schlobacha oraz metoda Grasselli. W literaturze są opisane także inne metody wykorzystujące układy z jedna lub dwoma tarczami ściernymi [4].

W metodzie Schoppera – Schlobacha określa się ubytek objętości badanej próbki tworzyw z grupy elastomerów na skutek ścierania na obracającym się walcowym bębnie z nawiniętym płótnem ściernym o określonej ziarnistości (rys. 9.2) [1, 4, 5]. Stosuje się odmianę A tej metody, gdy badana próbka nie obraca się wokół własnej osi podczas badania, oraz odmianę B, w której próbka wykonuje ruch obrotowy wokół własnej osi. W obu przypadkach stosuje się próbki odniesienia wykonane z mieszanek kauczukowych o różnym składzie, przygotowanych poprzez mieszanie w mieszarkach z komorą zamkniętą lub na walcach, a następnie wulkanizowanych w procesie prasowania. Szczegółowy opis składu oraz procesu otrzymywania próbek odniesienia są zawarte w zaleceniach odpowiedniej normy [5].

Miarą odporności na ścieranie elastomerów w metodzie Schoppera – Schlobacha jest względny ubytek objętości ΔV_{rel} [mm³] próbki pomiarowej w odniesieniu do ścieralności próbki wzorcowej (o składzie podanym w normie), zgodnie z zależnością

$$\Delta V_{rel} = \frac{\Delta m_t \cdot \Delta m_{const}}{\rho_t \cdot \Delta m_r}, \text{ mm}^3 \quad (9.2)$$

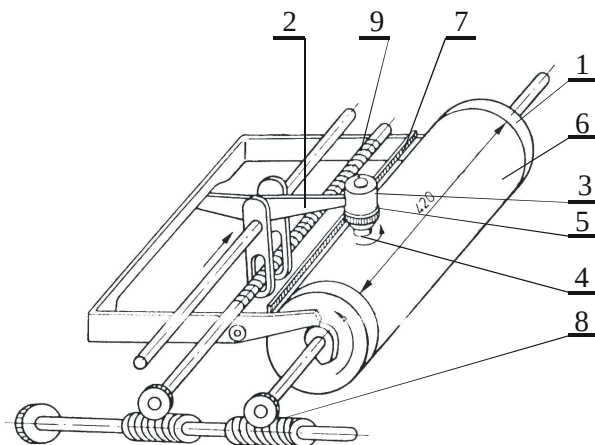
w której: Δm_t oznacza ubytek masy próbki badanej w mg, Δm_{const} oznacza ubytek masy próbki wykonanej z mieszanki odniesienia lub mieszanki wzorcowej, wynoszący 200 mg przy zastosowaniu odmiany A metody lub 150 mg przy zastosowaniu odmiany B metody, ρ_t jest gęstością próbki badanej w mg/mm³, natomiast Δm_r ubytkiem masy próbki wykonanej z mieszanki odniesienia w mg.

Dla pozostałych tworzyw miarę ścieralności X wyznacza się z zależności:

$$X = \frac{m_1 - m_2}{\rho_t \cdot L} \times 1000, \text{ mm}^3/\text{m} \quad (9.3)$$

w której: m_1 oznacza masę próbki przed ścieraniem, g, m_2 masę próbki po ścieraniu, g, ρ_t gęstość badanego tworzywa, g/cm³, L długość drogi ściera-

nia, m. Jednostką ścieralności X jest mm^3/m określający zmianę objętości próbki na drodze ścierania.



Rys. 9.2. Schemat urządzenia do pomiaru ścieralności metodą Schoppera – Schlobacha: 1 – bęben, 2 – dźwignia, 3 – uchwyt badanej próbki, 4 – badana próbka, 5 – koło zębate, 6 – płótno ściernie, 7 – listwa mocująca, 8 – przekładnia ślimakowa, 9 – śruba pociągowa [1]

Inną miarą ścieralności jest wskaźnik odporności na ścieranie ARI [%] obliczony zgodnie z zależnością

$$ARI = \frac{\Delta m_r \cdot \rho_t}{\Delta m_t \cdot \rho_r} \cdot 100\% \quad (9.4)$$

w której: ρ_r oznacza gęstość próbki odniesienia [g/cm^3] natomiast pozostałe oznaczenia jak we wzorze 9.2 [5].

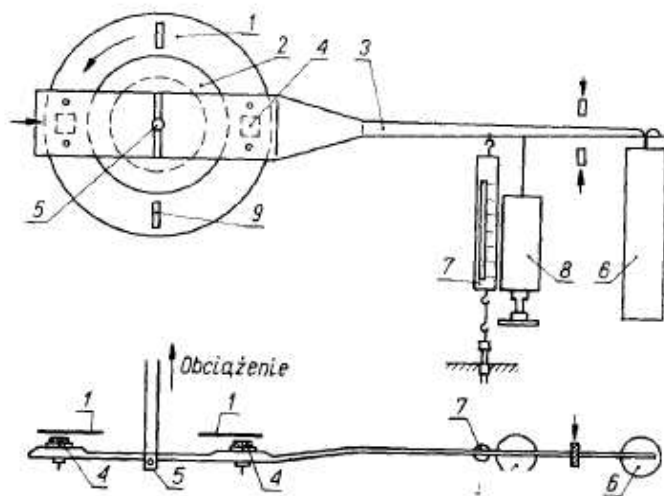
W metodzie Grasselli [4] badanie odporności na ścieranie polega na ścieraniu jednocześnie dwóch próbek dociskanych z siłą 36 N do wirującej tarczy ścierniej i wyznaczeniu zmiany objętości tych próbek oraz pracy zużytej na ścieranie. Próbki o określonym kształcie i wymiarach przygotowuje się przez zwulkanizowanie w odpowiedniej formie lub wycięcie z wyrobów gotowych. Schemat urządzenia przedstawiono na rysunku 9.3. Podczas badań na tarczę ścierną jest zakładany krążek papieru ściernego o odpowiedniej ziarnistości, który jest mocowany płytą dociskową. Tarcza obraca się w płaszczyźnie pionowej z prędkością $0,62\text{--}0,75 \text{ s}^{-1}$ i podczas badania jest oczyszczana i chłodzona sprężonym powietrzem. Próbki są zamocowane na dźwigni nierównoramiennej za pomocą ramek dociskowych i dociskane do tarczy z siłą około 36 N. Dłuższe ramię dźwigni jest połączone z dynamometrem i amortyzatorem. Badanie próbek

przeprowadza się w dwóch etapach, z których pierwszy jest przeznaczony na docieranie próbek tak, aby dokładnie przylegały do tarczy ścierniej, natomiast następny jest właściwym ścieraniem. Czas badania powinien odpowiadać 200 obrotom tarczy ścierniej. Badania przeprowadza się na minimum 6 próbkach.

Ścieralność K_{sGr} [cm^3/kWh] na aparacie Grasselli typu Du Pont Croydon oblicza się wg wzoru:

$$K_{sGr} = \frac{m_1 - m_2}{\rho \cdot M \cdot t} \cdot 3,5 \cdot 10^6 \quad (9.5)$$

w którym: m_1 oznacza łączną masę dwóch próbek po wstępnym docieraniu [g], m_2 – łączną masę dwóch próbek po zakończeniu ścierania [g], ρ jest gęstością badanej gumy [g/cm^3], t oznacza czas ścierania [s], M jest mocą ścierania obliczaną na podstawie pomiaru sił równoważących dźwignię obciążającą próbki [4].



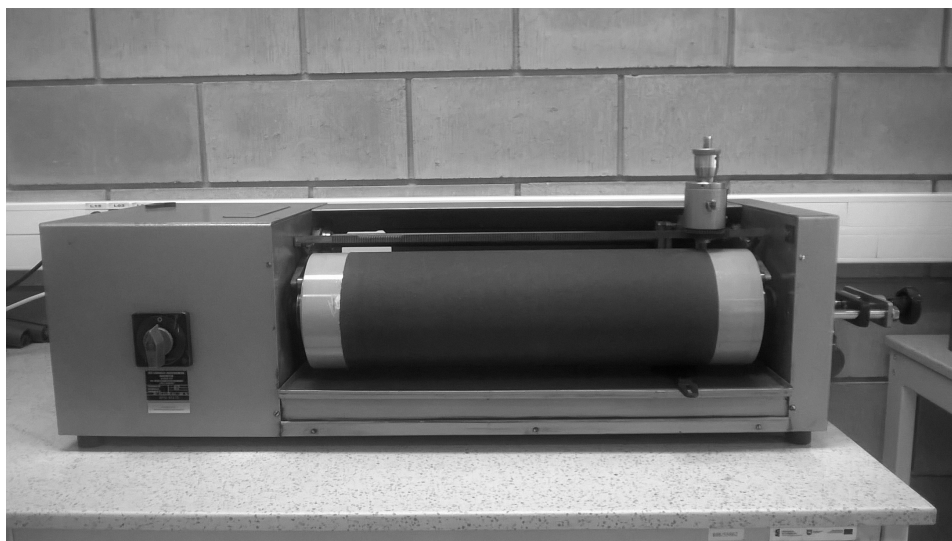
Rys. 9.3. Schemat aparatu Grasselli typu Du Pont Croydon: 1 – tarcza ścierna, 2 – płytk dociskowa, 3 – dźwignia nierównoramienna, 4 – ramka dociskowa, 5 – sworzeń, 6 – obciążenie, 7 – dynamometr, 8 – amortyzator, 9 – przewody powietrzne [4]

9.2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie metod wyznaczania odporności na ścieranie tworzyw oraz wyznaczenie odporności na ścieranie wybranych tworzyw z grupy elastomerów za pomocą aparatu z obracającym się bębniem metodą Schoppera – Schlobacha.

9.3. Stanowisko badawcze

Pomiary odporności na ścieranie metodą Schoppera – Schlobacha przeprowadza się na stanowisku pomiarowym, w skład którego wchodzi urządzenie Schoppera – Schlobacha (rys. 9.4, rys. 9.5), waga analityczna i suwmiarka. Urządzenie pomiarowe składa się z bębna walcowego o średnicy 150 mm i długości 460 mm, na którym jest zamocowane płótno ściernie korundowe nr 60, o wymiarach 450x475 mm. Bęben (1) jest napędzany silnikiem elektrycznym przez koło pasowe i przekładnię ślimakową (8) i obraca się z prędkością obrotową równą $0,67 \pm 0,02 \text{ s}^{-1}$. Nad bębniem równoległe to jego osi, jest zamocowana prowadnica (7), po której za pomocą śruby pociągowej (9) przesuwa się dźwignia (2). Podczas jednego obrotu bębna, śruba pociągowa przesuwa dźwignię wzdłuż jego osi o odległość 4,2 mm. Na jednym końcu dźwigni znajduje się uchwyt (3) do mocowania próbki (4) tworzywa. Masa uchwyty i dźwigni są tak dobrane, aby próbka walcowa dociskana była do bębna siłą $10 \pm 0,2 \text{ N}$.

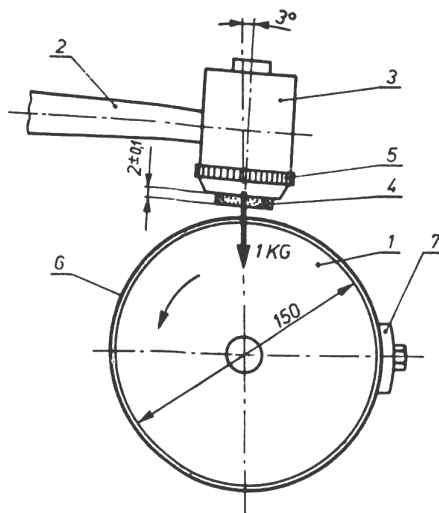


Rys. 9.4. Wygląd urządzenia Schoppera – Schlobacha do odporności na ścieranie tworzyw

W przypadku gdy guma badana ma twardość mniejszą niż 40 IRHD dopuszczalne jest stosowanie siły dociskającej mającej wartości $5 \pm 0,1 \text{ N}$, przy czym wyniki uzyskane przy różnych wartościach siły docisku są nieporównywalne.

Podczas każdego obrotu bębna próbka wraz uchwytem unosi się nad listwą (7) mocującą płótno ściernie (6), a czas uniesienia uchwyty powinien być tak dobrany aby droga ścierania próbki wynosiła $L = 40 \pm 2 \text{ m}$, co odpowiada 100 obrotom bębna. W szczególnych przypadkach, gdy ubytek objętości próbki ba-

danej jest duży dopuszcza się skrócenie drogi ścierania do 20 ± 1 m (42 obrotów bębna) lub nawet do 10 m. Dodatkowo podczas pomiaru próbka obraca się wokół własnej osi, przez obrót koła zębatego (5), wykonując 2,75 obrotów na całej drodze tarcia (odmiana B metody). Pomiar kończy się po 100 obrotach bębna, kiedy próbka badana jest podnoszona za pomocą krzywki, ponad powierzchnię płótna ściernego.



Rys. 9.5. Sposób ustawienia próbki badanej względem bębna: 1 – bęben, 2 – dźwignia, 3 – uchwyt próbki badanej, 4 – próbka badana, 5 – koło zębate, 6 – płótno ściernie, 7 – listwa mocująca

9.4. Program ćwiczenia

W programie badań przyjęto jako czynniki badane bezpośrednio:

- masę próbki badanej przed ścieraniem m_1 , g,
- masę próbki badanej po ścieraniu m_2 , g,
- masę próbki odniesienia przed ścieraniem m_3 , g,
- masę próbki odniesienia po ścieraniu m_4 , g.

Czynnikami badanymi pośrednio (wynikowymi) są:

- ubytek masy próbki badanej $\Delta m_t = m_2 - m_1$, mg,
- ubytek masy próbki odniesienia $\Delta m_r = m_3 - m_4$, mg,
- gęstość próbki badanej ρ_t , mg/mm^3 ,
- gęstość próbki odniesienia ρ_r , mg/mm^3 ,
- względny ubytek objętości ΔV_{rel} , mm^3 ,
- wskaźnik odporności na ścieranie ARI, %.

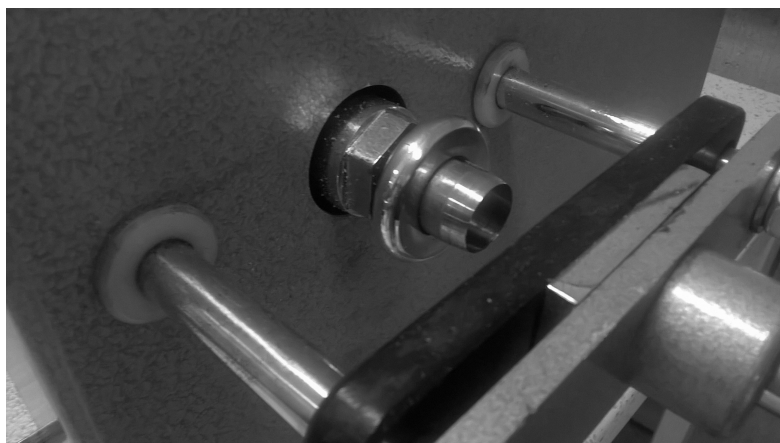
Czynnikiem zmiennym jest rodzaj badanego tworzywa (minimum dwa rodzaje tworzywa z grupy elastomerów).

Do czynników stałych należą cechy geometryczne urządzenia, prędkość obrotowa bębna $v_b = 0,67 \text{ s}^{-1}$ oraz ubytek masy próbki wykonanej z mieszanki wzorcowej Δm_{const} wynoszący 150 mg.

Czynniki zakłócające, których wpływ jest pomijalnie mały, to przede wszystkim niestabilność prądu elektrycznego, zmiany temperatury otoczenia, wilgotności próbek oraz wilgotności względnej powietrza.

9.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

Do pomiarów odporności na ścieranie metodą Schoppera – Schlobacha należy przygotować co najmniej po 3 próbki z dwóch rodzajów tworzywa elastomernego oraz 3 próbki odniesienia. Wszystkie próbki powinny mieć kształt walca o średnicy $D = 16 \pm 0,2 \text{ mm}$ i wysokości $h = 6\text{--}12 \text{ mm}$. Powierzchnie próbek powinny być gładkie, bez uszkodzeń i wtrąceń widocznych okiem nieuzbrojonym. Przed pomiarem próbki należy wyciąć z gotowych wytworów za pomocą wykrojnika stanowiącego integralną część urządzenia (rys. 9.6). Probki przygotowane wcześniej powinny być przed badaniem poddane klimatyzacji w temperaturze $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ przy wilgotności względnej powietrza $65 \pm 5\%$ w czasie 24 godzin.



Rys. 9.6. Wygląd wykrojnika do próbek urządzenia Schoppera – Schlobacha

W celu wykonania prawidłowo badania odporności na ścieranie należy:

- 1) Założyć arkusz płótna ściernego na bęben obrotowy urządzenia, wsuwając końce arkusza płótna pod listwę mocującą i zacisnąć śrubami.

- 2) Wyciąć za pomocą wykrojnika próbki oraz zmierzyć ich średnicę i wysokość.
- 3) Wykonać pomiar masy przygotowanych próbek na wadze analitycznej z dokładnością do ± 1 mg.
- 4) Określić gęstość próbek.
- 5) Umieścić kolejno każdą z próbek w uchwycie tak aby wystawała o wartość $2 \pm 0,1$ mm (rys. 5) poniżej dolnej krawędzi uchwytu.
- 6) Ustawić dźwignię z zespołem uchwytu próbki w lewym skrajnym położeniu urządzenia.
- 7) Włączyć napęd urządzenia i przeprowadzić proces ścierania.
- 8) Wyjąć każdą z próbek z uchwytu przez naciśnięcie na wyrzutnik oraz oczyścić z produktów ścierania przy użyciu pędzla lub miękkiej szmatki.
- 9) Wykonać ponownie pomiar masy próbki z dokładnością do ± 1 mg.
- 10) Obliczyć wartość względnego ubytku objętości próbek.
- 11) Obliczyć wartość wskaźnika odporności na ścieranie.
- 12) Wyniki pomiarów i obliczeń zestawić w tabelach.

9.6. Wyniki, sprawozdanie

Wyniki pomiarów należy zestawić w tabeli 1 natomiast wyniki obliczeń w tabeli 2 we wzorze sprawozdania. Prawidłowo sporządzone sprawozdanie powinno zawierać: cel ćwiczenia, przebieg ćwiczenia, wyniki badań odporności na ścieranie i ich wartości średnie zestawione w tabeli, interpretację wyników w postaci wykresów, wnioski wynikające z przeprowadzonego ćwiczenia.

Literatura:

- [1] Sikora R., *Tworzywa wielkokształeczkowe, Rodzaje, właściwości i struktura*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1991.
- [2] Rymuza Z., *Trybologia polimerów ślizgowych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1986.
- [3] Bieliński D. M., *Trybologia elastomerów i gumy z perspektywy inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji PIB, Radom 2009.
- [4] Broniewski T., Kapko J., Płaczek W., Thomalla J., *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [5] PN-ISO 4649:2007. *Guma i kauczuk termoplastyczny. Oznaczanie odporności na ścieranie za pomocą aparatu z obracającym się bębnem*.

Politechnika Lubelska Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych Laboratorium:			
Temat ćwiczenia: Właściwości tribologiczne		Nr ćwiczenia	Data wykonania
Nazwisko i imię	Ocena	Grupa	Semestr
			Rok akademicki

1. Cel ćwiczenia

2. Charakterystyka badań

3. Przebieg ćwiczenia

4. Wyniki

Tabela 1

Wyniki pomiarów

Lp.	Rodzaj tworzywa	m_1, g	m_2, g	m_3, g	m_4, g
1					
2					
3					
1					
2					
3					
1	Próbka odniesienia				
2					
3					

Tabela 2

Wyniki obliczeń odporności na ścieranie

Lp.	Rodzaj tworzywa	ρ_t , mg/mm ³	Δm_t , mg	ΔV_{rel} , mm ³	ARI, %	$\overline{\Delta V_{rel}}$, mm ³	$\overline{ARI}$, %
1							
2							
3							
1							
2							
3							
Próbka odniesienia		ρ_r , mg/mm ³		Δm_r , mg			

5. Wnioski

Data Podpis

10. Temperatury użytkowania tworzyw

10.1. Wiadomości wstępne

Tworzywa polimerowe mogą występować w jednym z trzech stanów fizycznych: szklistym, elastycznym i plastycznym. Stan szklisty charakteryzuje nieuporządkowanie makrocząsteczek, ale jednocześnie twardość i kruchość wynikająca z tego, iż jest on w tym stanie przechłodzona cieczą (jak szkło). Temperatura, w której następuje przejście ze stanu szklistego do elastycznego lub odwrotnie nazywa się temperaturą zeszklenia, oznaczana zwykle T_g . Temperatura przejścia ze stanu elastycznego do plastycznego lub odwrotnie nosi nazwę temperatury topnienia T_m . W stanie elastycznym pod wpływem przyłożonej siły tworzywo się odkształca, ale po pewnym czasie powraca do pierwotnego kształtu, w stanie plastycznym w wyniku przyłożonej siły trwale się odkształca.

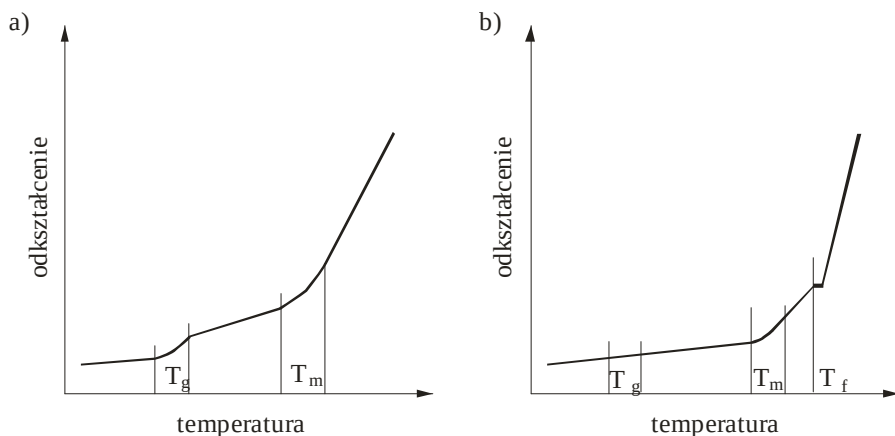
Właściwości cieplne tworzyw obejmują grupę zjawisk związanych w sensie fizycznym ze zmianami cech użytkowych (właściwości mechanicznych) pod wpływem wzrostu temperatury. Wiedza o właściwościach cieplnych tworzyw ma bardzo duże znaczenie w kontekście użytkowania produktów z nich wykonanych. W przeciwieństwie bowiem do metali i materiałów ceramicznych wyroby z tworzyw mogą być wykorzystywane w dużo mniejszym zakresie temperatur. Dla większości, górna temperatura stosowania waha się od 80–150 °C.

Podczas wzrostu temperatury w tworzywie polimerowym zachodzą zmiany strukturalne i reakcje chemiczne, intensyfikujące się podczas podwyższania temperatury, mogące prowadzić do rozkładu cieplnego tworzywa – degradacji, destrukcji, a czasami depolimeryzacji. W czasie użytkowania wyrobów z tworzyw polimerowych, wraz ze zmianą temperatury zmieniają się znacznie ich właściwości fizyczne, a zwłaszcza właściwości mechaniczne, może również nastąpić zmiana stanu skupienia tworzywa. Przejście tworzywa z jednego stanu skupienia w inny charakteryzuje temperatura znamionowa – temperatura zeszklenia, temperatura mięknięcia oraz temperatura topnienia.

Pod względem termodynamicznym tworzywo bezpostaciowe stanowi jeden stan ciekły i w związku z tym zmiany ich właściwości fizycznych z temperaturą przebiegają łagodnie. Tworzywa częściowo krystaliczne są układami dwufazowymi, składającymi się z fazy stałej (obszarów krystalicznych) i fazy ciekłej (obszarów bezpostaciowych), a więc zmiany ich właściwości fizycznych z temperaturą mają charakterystyczny skok związany z przejściem fazowym.

Podczas projektowania wytworów z tworzyw, przy przetwórstwie tworzyw, a szczególnie podczas eksploatacji wytworów z tworzyw znajomość wpływu temperatury na właściwości tworzyw staje się niezbędna. W tym celu dla poszczególnych tworzyw przeprowadza się badania i określa krzywe termomechaniczne, opisujące zmiany właściwości mechanicznych w zależności od temperatury.

Na rysunku 10.1 są przedstawione charakterystyczne zależności pomiędzy odkształceniem tworzywa bezpostaciowego i częściowo krystalicznego, a jego temperaturą przy stałym obciążeniu.



Rys. 10.1. Zależność odkształcenia od temperatury - krzywe termomechaniczne dla: a) tworzywa bezpostaciowego, b) tworzywa częściowo krystalicznego; T_g – temperatura zeszklenia, T_m – temperatura topnienia fazy bezpostaciowej, T_f – temperatura topnienia fazy krystalicznej

Jednak wyznaczenie takich krzywych, dla pełnego zakresu zmiany temperatury jest pracochłonne i kosztowne. W wielu przypadkach jest wystarczająca znajomość temperatury, do której wytwory z tworzyw mogą być użytkowane trwale, z zachowaniem wymagań jakościowych i bezpieczeństwa. Także przy wielu zastosowaniach wytworów z tworzyw, szczególnie jako elementów wyposażenia budownictwa, części konstrukcyjnych maszyn, a nawet do wyrobu zabawek, jest bardzo ważne określenie dopuszczalnej temperatury długotrwałego użytkowania tych wytworów. Ponieważ do tej pory nie ma dogodnej metody wyznaczania wartości tej wielkości, duże znaczenie mają metody badawcze, umożliwiające ustalenie umownej dopuszczalnej temperatury użytkowania wytworów z tworzyw, w których pod wpływem określonego obciążenia występują założone z góry odkształcenia.

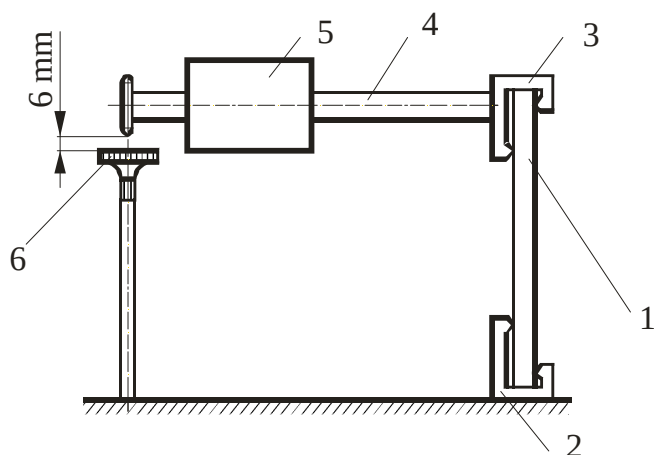
Znane są liczne metody doświadczalnego wyznaczania dopuszczalnej temperatury użytkowania tworzyw. Większość z nich polega na pomiarze temperatury, w której pod wpływem danego obciążenia, wystąpią założone wcześniej odkształcenia próbki tworzywa w znormalizowanych warunkach badania.

Jedną ze starszych metod wyznaczania dopuszczalnej temperatury użytkowania tworzyw jest metoda oznaczania temperatury ugięcia według Martensa [3]. Ma ona zastosowanie przede wszystkim do tworzyw w stanie szklistym.

Metoda ta polega na obciążaniu próbek tworzywa, przy stałym zwiększaniu temperatury, siłą o stałej wartości, powodującą powstawanie w materiale naprę-

żeń zginających. Powstające w próbce naprężenia oraz ciągły wzrost temperatury prowadzą w konsekwencji do jej wygięcia.

Temperaturę użytkowania badanego tworzywa się określa się w momencie, kiedy odkształcenie materiału osiągnie wartość 6 mm. Wymiar ten jest powszechnie uznawaną miarą odporności cieplnej, stosowaną w omawianej metodzie. Umowny charakter badań zmusza do rygorystycznego przestrzegania procedur wykonywania pomiaru. Badanie każdego materiału musi odbywać się w jednakowych warunkach których ośrodkiem podgrzewania próbki jest ciecz lub powietrze.



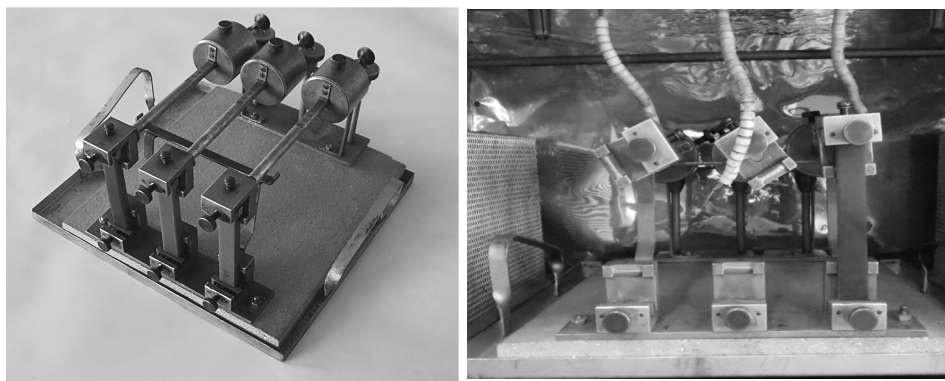
Rys. 10.2. Istota budowy stanowiska do wyznaczania temperatury ugięcia metodą Martensa: 1 – próbka pomiarowa, 2 – uchwyt mocujący dolny, 3 – uchwyt mocujący górny, 4 – dźwignia położenia obciążenia, 5 – obciążenie, 6 – tarcza regulacji wartości odkształcenia

Tabela.10.1

Dopuszczalna temperatura użytkowania niektórych tworzyw w °C,
badana metodą Martensa

Tworzywo	PP	E/P	PS	SAN	ABS	PTFE	PPO	PA6
Temperatura ugięcia	55–56	50–51	80–82	84–85	71–95	54–55	259–260	58–59

Ten rodzaj metody określa wytrzymałość mechaniczną tworzyw podczas ogrzewania. Próbki o znormalizowanych wymiarach poddaje się stałym momentom zginającym przy jednoczesnym podnoszeniu temperatury począwszy od 23 ± 2 °C z szybkością 50 °C/h.



Rys. 10.3. Stanowisko badawcze do badania właściwości cieplnych metodą Martena, wygląd układu mocowania próbek, przed oraz po zamontowaniu w komorze grzejnej

Temperaturę ugięcia wyznacza się również metodą odkształcenia pod obciążeniem HDT (Heat Deflection Temperature) [4]. Metoda ta polega na określeniu temperatury, przy której znormalizowany trzpień przyrządu pomiarowego aparatu, przy założonym obciążeniu, spowoduje odpowiednie co do wartości ugięcie próbki pomiarowej.

W metodzie tej znormalizowaną kształtkę do badań w zalecany położeniu płaskim lub krawędziowym, poddaje się trójpunktowemu zginaniu pod stałym obciążeniem do uzyskania jednej z wartości naprężeń zginających. Temperaturę podwyższa się ze stałą szybkością i mierzy się temperaturę, w której osiągnie się ugięcie standardowe, odpowiadające określonej przyrostowi odkształcenia zginającego, w zależności od grubości badanych próbek (Tabela 10.1).

Tabela 10.2

Przykładowe ugięcia standardowe dla różnych grubości próbki w położeniu płaskim

Grubość h badanej próbki, mm	Ugięcie standardowe, mm
3,8	0,36
3,9	0,35
4,0	0,34
4,1	0,33
4,2	0,32

Zginanie następuje pod działaniem określonego obciążenia nominalnego przy równomiernej szybkości przyrostu temperatury, w łaźni olejowej, równej 120 ± 10 °C/h.

Wymiary próbek stosowanych w poszczególnych położeniach zestawiono w tabeli 10.3.

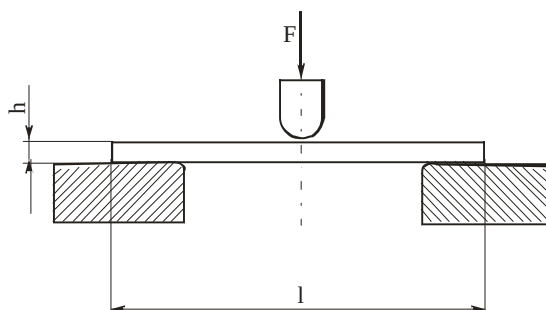
Tabela 10.3

Wymiary próbek do badań HDT

Wymiar	Próbki w położeniu płaskim	Próbki w położeniu krawędziowym
Długość l , mm	$80 \pm 0,2$	120 ± 10
Szerokość b , mm	$10 \pm 0,2$	9,8–15
Grubość h , mm	$4 \pm 0,2$	3,0–4,2

Wyróżnia się trzy metody do określenia odkształcenia pod obciążeniem zginającym:

- metoda A; wykorzystująca obciążenie nominalne = 1,80 MPa,
- metoda B; wykorzystująca obciążenie nominalne = 0,45 MPa,
- metoda C; wykorzystująca obciążenie nominalne = 8,0 MPa.



Rys. 10.4. Zasada odkształcania próbki w metodzie HDT (Heat Deflection Temperature)

W czasie dokonywania pomiaru ważne jest odpowiednie rozstawienie podparciai próbki pomiarowej, które zgodnie z normą [4] powinno wynosić 64 lub 100 mm w zależności od długości próbki. Próbkę należy umieścić tak, aby jej oś wzdlużna była prostopadła do osi podparć. Końce próbki powinny wystawać na jednakowa długości z obu podparć. Umożliwi to dokładnie zamierzony rozkład siły nacisku powierzchniowego.

Następnie dobiera się odpowiednie obciążenie obciążające próbkę i umieszcza się je w układzie obciążającym aparatu. Po wykonaniu tych czynności można zanurzyć próbkę w łaźni olejowej. Temperatura, w której powinny rozpocząć się badania musi być niższa lub równa 27 °C [4].

Najważniejszą z metod stosowaną wyłącznie do tworzyw termoplastycznych jest metoda oznaczania temperatury mięknienia według Vicata (VST) [5].

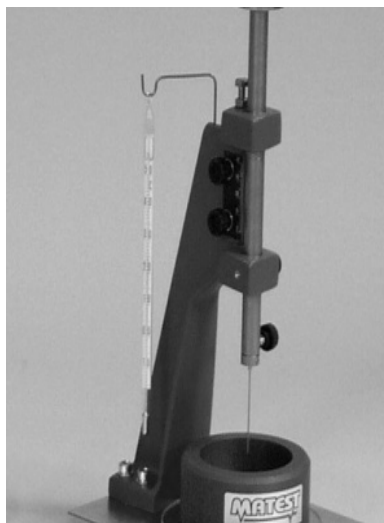
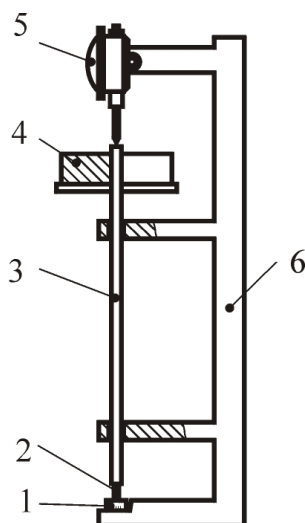
Metoda ta polega na określeniu temperatury, przy której znormalizowana igła przyrządu pomiarowego aparatu Vicata, zagłębi się w powierzchnię próbki pomiarowej badanego tworzywa na określoną głębokość pod działaniem określonego obciążenia przy równomiernej szybkości przyrostu temperatury.



Rys. 10.5. Wygląd aparatu HDT firmy Zwick z widocznym układem obciążeniowym [www.zwick.com.pl]

Wgłębnik o znormalizowanych wymiarach (długość 3 mm, przekrój kołowy końcówki $1\text{ mm} \pm 0,015\text{ mm}^2$) zagłębia się w próbkę na głębokość 1 mm, przy stałym wzroście temperatury i pod wpływem zadanych obciążeń. Temperatura, przy której następuje zagłębienie wgłębnika w materiał na 1 mm, jest temperaturą mięknięcia Vicata ($^{\circ}\text{C}$).

W zależności od zastosowanej szybkości przyrostu temperatury rozróżnia się dwa warianty pomiaru temperatury mięknięcia według Vicata. Pierwszy (I) – stosowany jest przy szybkości przyrostu temperatury równej $50 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, natomiast drugi (II) – przy szybkości $120 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C/h}$.



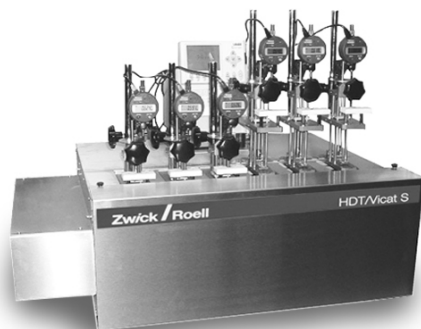
Rys. 10.6. Schemat oraz wygląd rzeczywisty aparatu Vicata: 1 – próbka badawcza, 2 – wgłębnik, 3 – pręt, 4 – obciążenie pomiarowe, 5 – czujnik mikrometryczny, 6 – rama z podstawą [www.jetmatest.com]

W metodzie Vicata możemy zastosować obciążenia o wartościach 10 N i 50 N. Próbkę do badania tą metodą mają kształt prostopadłościanów. Szerokość i długość wynoszą 10 mm, natomiast wysokość próbek może wynosić od 3 mm do 6,4 mm.

Układ pomiarowy z zamocowanymi próbkami umieszcza się następnie w łaźni olejowej. Zaopatrzona jest ona w grzałki w których automatycznie następuje regulowanie wzrost temperatury. Olej musi zachowywać się obojętnie wobec badanego tworzywa i nie zmieniać swoich właściwości wraz ze wzrostem temperatury. W zastępstwie oleju, badania można przeprowadzać przy wykorzystaniu gliceryny lub w powietrzu. Niezależnie od ośrodka, w celu zapewnienia równomiernego rozkładu temperatury, ciecz lub gaz należy mieszać.

Schemat oraz wygląd przykładowego, prostego w budowie, stanowiska badawczego umożliwiające oznaczanie temperatury mięknięcia tworzyw przedstawiono na rys. 10.6.

Na rys. 10.7 pokazano nowoczesne, skomputeryzowane stanowisko badawcze firmy Zwick, wyposażone w aparaturę do pomiarów temperatury metodą Vicata, umożliwiające przeprowadzenie oznaczania dla trzech próbek jednocześnie.



Rys. 10.7. Wygląd aparatu Vicata firmy Zwick z widocznym układem pomiarowym [www.zwick.com.pl]

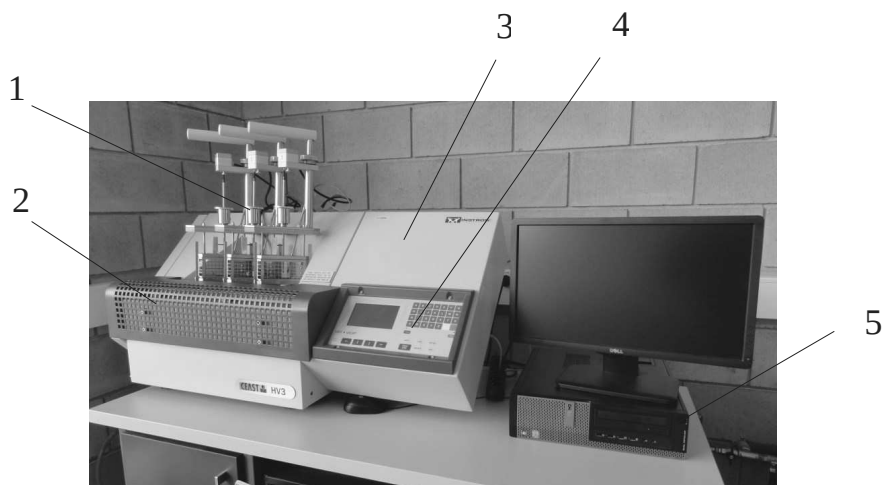
Aparat ten składa się z przyrządu do obciążania próbek i oznaczania temperatury mięknięcia oraz z termostatu szafkaowego. Układ pomiarowy z zamocowanymi próbkami umieszcza się następnie w łaźni olejowej. Zaopatrzona jest ona w zespół grzejny automatycznie regulujący wzrost temperatury. Olej musi zachowywać się obojętnie wobec badanego tworzywa i nie zmieniać swoich właściwości wraz ze wzrostem temperatury. W zastępstwie oleju, badanie może odbyć się w glicerynie lub powietrzu.

10.2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie metody wyznaczania temperatury mięknięcia tworzyw metodą Vicata oraz temperatury ugięcia metodą HDT. Celem ćwiczenia jest również wyznaczenie temperatury mięknięcia oraz ugięcia wybranych tworzyw termoplastycznych.

10.3. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze umożliwiające pomiar temperatury mięknięcia oraz temperatury ugięcia jest wyposażone w urządzenie pomiarowe CEAST HV3 oraz stanowisko komputerowe wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem Visual THERM. Stanowisko badawcze umożliwia przeprowadzenie pomiaru dla trzech próbek jednocześnie.



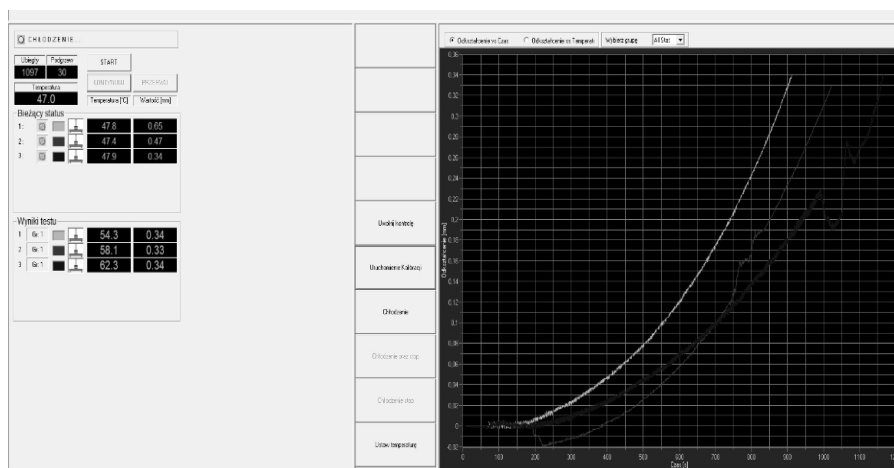
Rys. 10.8. Urządzenie pomiarowe CEAST HV3 wraz ze stanowiskiem komputerowym: 1 – stacje pomiarowe, 2 – osłona łaźni temperaturowej, 3 – obudowa części górnej, 4 – elektroniczna jednostka sterowania i kontroli, 5 – stanowisko komputerowej obsługi urządzenia

Urządzenie pomiarowe obejmuje następujące główne elementy:

- łaźnia temperaturowa z systemem grzania i chłodzenia oleju oraz azotowy system dyfuzyjny,
- pompa cyrkulacyjna do oleju oraz mieszadła,
- 3 stacje pomiarowe, w składzie: układ przykładania obciążeń, sensor pomiarowy LVDT, sonda temperaturowa, miernik poziomu oleju,
- zawory elektryczne systemu chłodzenia wodnego, zawory azotu gazowego, termostatów bezpieczeństwa,

- elektroniczna jednostka sterowania i kontroli wraz z dotykową i wyświetlaczem LCD,
- stanowisko komputerowe obsługi urządzenia wraz z oprogramowaniem Visual THERM,
- obudowa.

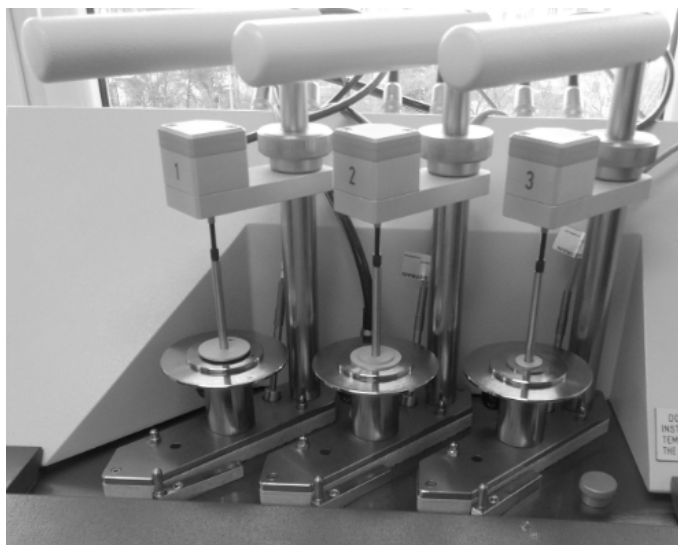
Urządzenie umożliwia określanie temperatury mięknięcia pod obciążeniem wg Vicata (VST) oraz temperatury ugięcia pod obciążeniem (HDT), zgodnie z normami ISO 306 oraz ISO 75 [4, 5]. Urządzenie wyposażone jest w sześć stacji pomiarowych (3 stacje do VST, 3 stacje do HDT) w zależności od rodzaju przeprowadzanych badań. Test odkształceń w wyznaczonych warunkach temperaturowych oraz obciążających przeprowadza się z odpowiednią szybkością grzania w łaźni olejowej. Całość urządzenia sterowana jest przez mikroprocesor. Urządzenie posiada przetworniki LVDT oraz niezależne czujniki temperatur. Umożliwia to uzyskiwanie bardzo dokładnych wyników o dużej powtarzalności. Po zakończonym teście włącza się system chłodzenia. Przywraca on temperaturę początkową, od której rozpoczęto badanie, umożliwiając szybkie przeprowadzenie kolejnych testów.



Rys. 10.9. Interfejs graficzny programu VisualTHERM

Oznaczanie temperatury ugięcia metodą Vicata (VST)

W stosowanym urządzeniu CEAST HV3 możemy zastosować jedną z czterech metod pomiarowych wyznaczania temperatury mięknięcia metodą Vicata, różniące się stosowanym obciążeniem pomiarowym oraz przyrostem temperatury w łaźni olejowej.

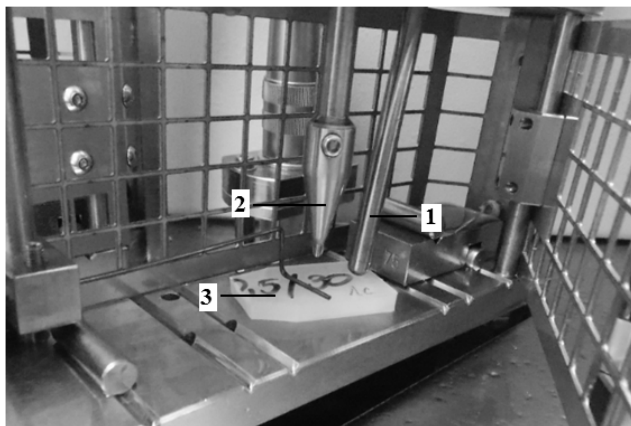


Rys. 10.10. Stacje pomiarowe 1, 2, 3 zanurzone w łaźni olejowej, w trakcie wykonywania pomiarów temperatury mięknięcia metodą Vicata

Wyróżnia się cztery metody określania temperatury mięknięcia metodą Vicata:

- **metoda A 50:** temperatura przyrasta z szybkością 50 ± 5 °C/h, stosowane obciążenie pomiarowe: 10 N,
- **metoda B 50:** temperatura przyrasta z szybkością 50 ± 5 °C/h, stosowane obciążenie pomiarowe: 50 N,
- **metoda A 120:** temperatura przyrasta z szybkością 120 ± 10 °C/h, stosowane obciążenie pomiarowe: 10 N,
- **metoda B 120:** temperatura przyrasta z szybkością 120 ± 10 °C/h, stosowane obciążenie pomiarowe: 50 N.

Próbki pomiarowe, o grubości 3–6,4 mm oraz szerokości i wysokości odpowiednio po 10 mm, montowane są pod igłą wgłębnika z nieobciążonym trzpieniem, w taki sposób by odległość końca wgłębnika od próbki nie była mniejsza niż 3 mm. Powierzchnia płytki, w której następuje kontakt z wgłębnikiem powinna być możliwie jak najbardziej płaska. Czujniki temperatury muszą znajdować się w takiej samej odległości w każdej ze stacji. Następnie badane próbki zanurza się w łaźni olejowej. Temperatura w łaźni nie powinna być wyższa niż 25 °C. Następnie badane próbki należy obciążyć, znajdującymi się w zestawie odważnikami. Dla metod: A 50 i A 120 obciążenie próbki powinno wynosić 10 N ($\pm 0,2$ N), natomiast w metodzie B 50 i B 120 – 50 N (± 1 N).



Rys. 10.11. Umieszczenie próbki wewnątrz stacji pomiarowej podczas pomiarów temperatury mięknięcia według Vicata: 1 – termopara, 2 – węgelnik, 3 – próbka

Oznaczanie temperatury ugięcia (HDT)

Oznaczanie temperatury ugięcia (HDT) wykonywane jest według normy PN-EN ISO 75-1/2:2006. W metodzie stosuje się trzpień o znormalizowanych wymiarach (rys. 10.12) który w ustalonych warunkach powoduje ugięcie próbki o ustaloną wartość, przy stałym wzroście temperatury i pod wpływem zadanych obciążeń. Temperatura, przy której następuje ustalone ugięcie materiału, jest temperaturą ugięcia wyrażoną w °C.



Rys. 10.12. Wygląd trzech stacje pomiarowych do pomiarów temperatury ugięcia metodą HDT, wraz z próbkami pomiarowymi oraz widocznymi trzpieniami do ugięcia próbek

Ugięcie próbek należy określić na podstawie wymiarów próbek pomiarowych, zgodnie z tabelą 10.1, przy wykorzystaniu programu sterującego Visual-THERM. Zginanie następuje pod działaniem określonego, na podstawie wymia-

rów próbek, obciążenia nominalnego przy równomiernej szybkości przyrostu temperatury, w łaźni olejowej, równej 120 ± 10 °C/h.

10.4. Program ćwiczenia

W programie badań przyjęto jako czynniki badane:

1) bezpośrednio

- temperaturę mięknięcia tworzyw metodą Vicata, VST, °C,
- temperaturę ugięcia metodą HDT, HDT, °C.

Czynnikiem zmiennym jest:

- rodzaj badanego tworzywa (minimum dwa rodzaje tworzywa lub jeden rodzaj tworzywa z napełniaczami),
- warunki technologiczne otrzymywania wyrobów w procesie wytłaczania, prasowania lub wtryskiwania.

Czynnikami stałymi są:

- elementy konstrukcyjne urządzenia CEAST HV3, stacje pomiarowe,
- warunki pomiarowe (obciążenie pomiarowe, prędkość nagrzewania) podczas prowadzenia badań temperatur użytkowania tworzyw.

Czynniki zakłócające, których wpływ jest pomijalnie mały, to przede wszystkim niestabilność prądu elektrycznego, zmiany temperatury otoczenia, wilgotności tworzywa wejściowego oraz wilgotności względnej powietrza.

10.5. Przeprowadzenie ćwiczenia

W celu prawidłowego wykonania pomiarów wyznaczania temperatury mięknięcia tworzyw metodą Vicata oraz temperatury ugięcia metodą HDT należy przeprowadzić następujących czynności:

- 1) Włączyć urządzenie CEAST HV3, komputer, program sterujący obsługi stanowiska.
- 2) Przeprowadzić pomiary próbek badawczych, w zależności od stosowanej metody, oraz wprowadzić dane do programu sterującego.
- 3) Ułożyć poziomo próbki na podstawie stacji pomiarowej do obciążania i wyznaczania temperatury ugięcia lub mięknięcia, w taki sposób, aby końcówka wgłębnika (w metodzie Vicata) lub końcówka trzpienia zginającego (w metodzie HDT) stykała się z powierzchnią pomiarową próbki w odległości nie mniejszej niż 3 mm od jej krawędzi oraz zamknąć drzwiczki termostatu komorowego.
- 4) Założyć obciążenie pomiarowe, w zależności od zastosowanej metody pomiarowej.

- 5) Nastawić wskaźnik pomiarowy czujnika mikrometrycznego na wartość $1 \pm 0,1$ mm.
- 6) Ustawić termoregulator przyrostu temperatury na wartość wynoszącą 50 ± 5 °C w ciągu 1 godziny lub 120 ± 10 °C, w zależności od przyjętego wariantu oznaczania.
- 7) Odczytać z dokładnością 1 °C temperaturę mięknięcia według Vicata, przy której igła przyrządu zagłębi się w badaną próbkę na $1 \pm 0,1$ mm.
- 8) Odczytać z dokładnością 1 °C temperaturę ugięcia według HDT, przy której nastąpiło ugięcie próbek pomiarowych o ustaloną wartość, mm.
- 9) Za wynik końcowy pomiaru – temperaturę mięknięcia według Vicata, temperaturę ugięcia metodą HDT przyjmuje się średnią arytmetyczną wartości temperatury dla co najmniej dwóch badanych próbek, zaokrągloną do całych wartości °C.
- 10) Po zakończeniu pomiaru, pozostawić stację pomiarową w łaźni olejowej do ochłodzenia. Po osiągnięciu temperatury oleju poniżej 50 °C wyjąć stację pomiarową z łaźni, próbki wyjąć z uchwytów i poddać oględzinom.

10.6. Wyniki, sprawozdanie

Wyniki pomiarów i badań należy zestawić w tabelach oraz przedstawić graficznie, zgodnie z zamieszczonym we wzorze sprawozdania wzorami wykresów. Prawidłowo sporządzone sprawozdanie powinno zawierać: cel ćwiczenia, przebieg ćwiczenia, warunki oznaczania temperatury mięknięcia VST, temperatury ugięcia HDT, wyniki pomiarów zestawione w tabelach, interpretację wyników w postaci wykresów blokowych, wnioski wynikające z przeprowadzonego ćwiczenia.

Literatura

- [1] *Dokumentacja techniczno-ruchowa urządzenia CEAST HV3*, Lublin 2013.
- [2] Broniewski T. i inni, *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000
- [3] PN-C-89025:1990. *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie temperatury ugięcia metodą Martensa*.
- [4] PN-EN ISO 75-1:2006. *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie temperatury ugięcia pod obciążeniem. Część 1: Ogólna metoda badania*.
- [5] PN-EN ISO 306:2014. *Tworzywa sztuczne. Tworzywa termoplastyczne. Oznaczanie temperatury mięknięcia według Vicata (VST)*.

Politechnika Lubelska Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych Laboratorium:			
Temat ćwiczenia: Temperatura użytkowania tworzyw		Nr ćwiczenia	Data wykonania
Nazwisko i imię	Ocena	Grupa	Semestr
			Rok akademicki

1. Cel ćwiczenia

2. Charakterystyka badań

3. Przebieg ćwiczenia

4. Wyniki

Tabela 1

Wyniki pomiarów temperatury ugięcia tworzyw badanej metodą HDT

Lp.	Rodzaj tworzywa	Przekrój próbki mm ²	Obciążenie pomiarowe, <i>g</i>	Temperatura ugięcia <i>HDT</i> , °C	$\overline{HDT}$ °C
1					
2					
3					

HDT, °C					

rodzaj próbki

Tabela 2

Wyniki pomiarów temperatury mięknięcia tworzyw badanej metodą Vicata

Lp.	Rodzaj tworzywa	Przekrój próbki mm ²	Obciążenie pomiarowe, <i>g</i>	Temperatura mięknięcia <i>VST</i> , °C	$\overline{VST}$ °C
1					
2					
3					

VST, °C

rodzaj próbki

5. Wnioski

Data Podpis